MÓNICA G. SALOMONE
Y ÁNGEL GÓMEZ ROLDÁN

UN UNIVERSO GRAVITACIONAL

La fuerza que gobierna el cosmos, de la materia oscura a los agujeros negros



Desde el espacio-tiempo descrito por Einstein hasta la detección de ondas gravitacionales, en poco más de un siglo hemos asistido a una incesante sucesión de descubrimientos astronómicos. Como resultado de todos ellos, nuestra comprensión sobre el origen, la evolución y la estructura del universo en que vivimos ha cambiado radicalmente.

A pesar de la diversidad de esos fenómenos, todos ellos comparten una misma protagonista, un ingrediente que contribuye de forma decisiva a moldear el cosmos tal y como lo conocemos. Nos referimos a la fuerza de gravedad.

Mónica G. Salomone & Ángel Gómez Roldán

Un universo gravitacional

La fuerza que gobierna el cosmos, de la materia oscura a los agujeros negros

ePub r1.0

baloocan 08.01.2024

Título original: *Un universo gravitacional*
Mónica G. Salomone y Ángel Gómez Roldán, 2016
El presente libro es una edición ampliada y actualizada del que apareció publicado por primera vez en EMSE EDAPP, S. L., con el título *Universo gravitacional* Prólogo: Pampa García Molina, 2021

Editor digital: baloocan ePub base r2.1



UN UNIVERSO GRAVITACIONAL

La fuerza que gobierna el cosmos, de la materia oscura a los agujeros negros

MÓNICA G. SALOMONE

Y ÁNGEL GÓMEZ ROLDÁN

Prólogo de Pampa García Molina

Shackleton books

Índice de contenido

Prólogo

Pampa García Molina
Periodista y divulgadora científica

Terminé mi licenciatura en Física, con la especialidad de física teórica, en el año 2001, sintiéndome una intrusa. No solo porque desde el inicio estuviera convencida de que yo iba a ser periodista de ciencia y no científica; sino, fundamentalmente, porque mis compañeros parecían comprender todo aquello y yo, no. Me sentía muy cómoda en el universo de las matemáticas, pero la física se me escapaba. Asistía a las clases —no a todas— e iba aprobando, incluso con nota, esos exámenes de cuatro horas en los que estaba permitido llevar todos los apuntes y materiales que creyéramos necesitar, pero hice la carrera siendo consciente de no estar entendiendo muchas cosas, y lamentándolo. Para mí la física teórica tenía un evidente sentido como bellísima descripción, como una narración elegante escrita en un lenguaje matemático que me fascinaba, de eso no había duda; sin embargo, las ideas se me deshacían entre los dedos al tratar de traducirlas a conceptos intuitivos. En medio de ese caos mental, me consolaba infinitamente leer libros de filosofía de la ciencia y de divulgación, libros que pasaban las horas muertas en la biblioteca de la facultad porque nadie más los sacaba de allí y que a mí me servían como masilla intelectual. Eran el pegamento que ordenaba muchas piezas del puzle teórico que tenía en mi cabeza y las conectaba con el mundo real que yo quería comprender.

Dos décadas después, con mis canas como periodista de ciencia, una de las cosas que me divierten de la profesión es observar la lista de los contenidos que cada año tienen más éxito, y que, curiosamente, se mantienen invariables. Antes de empezar mi trabajo en la agencia SINC tuve la suerte de ser redactora de *Muy Interesante*, la revista reina de la popularización de la ciencia y una de las publicaciones más leídas de los quioscos españoles, donde aprendí las claves del oficio. Allí me sorprendió conocer cuáles eran los temas estrella, los que siempre triunfaban: el sexo, la salud, los dinosaurios y los misterios del cosmos. Esto fue muy revelador. No solo nos interesan aquellos temas con los que conectamos porque en ellos nos van la vida y el bienestar personal —como el sexo y la salud—; a los seres humanos también nos mueve la fascinación intelectual, queremos entender lo

que se escapa a nuestra intuición. Nos gusta hacernos preguntas tan difíciles como «¿De qué está hecho el universo?» o «¿Por qué se extinguieron enormes criaturas?» y tratar de indagar en las respuestas. Esa fascinación es un material de trabajo riquísimo y de ella se nutren los autores de este libro: Mónica Salomone, una de las periodistas y escritoras de ciencia con más solera, curiosidad y solidez de nuestro país, especialmente curtida en lides astronómicas, y Ángel Gómez-Roldán, experto divulgador científico y redactor jefe de la revista *Astronomía*, que trabajó durante catorce años como operador de telescopios en el Instituto de Astrofísica de Canarias.

Pero no solo sirve con explotar la fascinación del lector. Muchos libros de divulgación en nuestro país exprimen este recurso hasta dejarlo seco y les falta, a mi modo de ver, un enfoque que vaya más allá; que construya una historia valiosa en sí misma. Se les olvida la literatura, la narrativa. Esa carencia, en mi opinión, es bastante típica en la divulgación que tradicionalmente se ha publicado aquí, donde la protagonista suele ser la pedagogía, el tonillo de «concéntrate, que te voy a enseñar cosas superinteresantes». Personalmente, echo en falta una divulgación hecha en España que me trate como a una lectora de no ficción, no como a una estudiante. Echo en falta una divulgación que se tome la molestia de construir una narración, de crear un relato, y, para eso, el periodismo es el oficio maestro.

En *Un universo gravitacional* nos asomamos a la cosmología y la astrofísica abriendo cuatro ventanas muy concretas. Todas ellas tienen que ver con una de las fuerzas fundamentales, la más intuitiva, la que hemos experimentado desde que, siendo bebés, soltábamos el sonajero para observar cómo caía —y sentir el placer de confirmar esa expectativa—, y, a la vez, la más difícil de integrar en el corpus de la física teórica, la que trae de cabeza a los que sueñan con una descripción unificada de las interacciones de la naturaleza o teoría del todo: la gravedad. Esas cuatro ventanas se han escogido con un excelente criterio narrativo y científico: la materia oscura, los agujeros negros, las ondas gravitacionales y los túneles en el espacio-tiempo. Y cada vez que los autores se asoman a una de estas ventanas, lo hacen para preguntar a las personas que trabajan en esas áreas de conocimiento y escribir el relato a través de lo que está sucediendo ahora, en la ciencia que se construye en la actualidad. De hecho, en uno de los capítulos, Mónica Salomone contacta con la cosmóloga Alicia Sintes pocos días antes del anuncio de la que fue, sin duda, la noticia científica de 2016 —¿Se acuerdan de los años en los que las noticias de ciencia no trataban sobre la pandemia de la covid-19?—: la primera detección histórica de ondas gravitacionales. Por eso, en

aquel momento, Alicia le dice a Mónica que no podrá atender su llamada hasta una semana después.

Este libro muestra un ejercicio de puro periodismo científico, del que se hace investigando y levantando el teléfono. La autora ofrece al lector un enfoque propio sobre aspectos complejos de la realidad, construido a través de su indagación personal y de horas de entrevistas con sus fuentes. Narra los hechos, nos habla de lo que está pasando. Cuenta la historia de la ciencia contemporánea en directo. Y, como quien nos la cuenta no es una erudita, sino una verdadera narradora de la ciencia, la entendemos. Nos permite saborear la nata de un pastel enorme con mil capas superelaboradas sin que para ello tengamos que hacer un curso avanzado en Le Cordon Bleu.

Ahora, veinte años después de haber conseguido ese título que reza «Licenciada en Física», y con muchas lecturas de divulgación a mis espaldas, pienso que ojalá me hubiera encontrado con este libro por aquel entonces. Seguramente no habría pasado de refilón por la asignatura de Gravitación y Cosmología, sino que me habría enterado de algo y hasta la habría saboreado. Que a ustedes les aproveche.

Introducción

Con las manos en el teclado

Imagine estar observando una estrella gigante sabiendo que ésta tiene los días contados para morir como supernova.

Si lee usted habitualmente libros de divulgación, sabrá que una de las metáforas más comunes es la que equipara las estrellas a seres vivos, aunque unos seres vivos con la secuencia un poco alterada: las estrellas nacen, crecen, se mantienen en la mediana edad un tiempo corto o largo en función de su masa, después mueren y, por último, se reproducen. Las estrellas con mucha masa, las gigantes, son las que más rápido completan el ciclo —se podría decir que viven intensa pero brevemente—, y la culpa es de la gravedad: en un determinado momento de la «vida» de las estrellas muy masivas, la fuerza gravitacional que genera su propia masa las hace implosionar, en un proceso que acaba en una brillante supernova. Bien, pues imagínese que llevan años espiando a una estrella cuya gravedad está a punto de provocar ese magnífico fenómeno cósmico. La estrella puede colapsar en cualquier momento, pero claro, en astrofísica, «cualquier momento» puede ser cualquier milenio. En otras palabras, usted sabe que es muy improbable que la estrella explote justo ante los detectores de su telescopio y, sin embargo, sigue observando.

Y, contra todo pronóstico, ¡ocurre!

Después de frotarse los ojos y dar unos cuantos saltos ante la pantalla del ordenador —o del objetivo del telescopio, porque aún hay astrónomos aficionados que descubren supernovas—, usted alerta de su hallazgo a la comunidad astronómica internacional para que otros muchos telescopios apunten al astro. Y, desde luego, para compartir la emoción con sus iguales en todo el planeta.

Sería, sin duda, exagerado afirmar que nosotros, los autores de este libro, hemos sentido el mismo tipo de emoción que un observador que ve con sus propios ojos cómo estalla la supernova que ha esperado durante años. Pero algo de eso hay.

Cuando planteamos el tema de esta obra pensamos en capturar instantáneas que reflejaran el estado actual de la investigación en cuanto a algunos de los mayores interrogantes vigentes en la actualidad, no solo en astronomía, sino en la ciencia en sentido amplio. Queríamos contar, a través de escenas escogidas, si se está progresando o no en la tarea de dar respuesta a las preguntas eternas

de la humanidad. Y no estamos siendo grandilocuentes: hablamos de cuestiones tan trascendentes como de qué está hecho el universo o cuál es la naturaleza del espacio-tiempo.

Pero ¿cómo escoger las escenas adecuadas? ¿De qué parte del «cuerpo» de la investigación astrofísica de hoy debíamos extraer las «catas» para que sirvieran de muestra representativa, para que transmitieran una idea real de lo que están descubriendo los investigadores en estos momentos?

Decidimos usar como guía la fuerza de la gravedad. Así, sin más: la gravedad. Sucede que, de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza, ésta es quizás la que manejamos más conscientemente en nuestra experiencia vital. Ya de bebés aprendemos a calibrar nuestro movimiento en función de la gravedad. Durante toda la vida jugamos con ella, nos protegemos de ella, la vencemos para llegar más rápido de un sitio a otro. Amoldamos nuestra existencia a su intensidad y a sus reglas. Pero a la vez, la gravedad, por familiar y «nuestra» que parezca, es también la fuerza que dibuja las órbitas de los astros; la que a lo largo de más de 13 000 millones de años ha ido definiendo la arquitectura del universo; la que determina la forma e incluso el movimiento del mismísimo espacio-tiempo, hasta el extremo de llegar a agujerearlo y hacerlo vibrar.

La idea de que una fuerza tan cotidiana como la gravedad tenga al mismo tiempo el poder de construir cúmulos y supercúmulos de galaxias, de dar lugar a fenómenos tan exóticos como los agujeros negros, nos pareció muy poderosa. Algo que los humanos sí sentimos de modo muy palpable resulta estar jugando un papel clave en fenómenos y procesos que quedan mucho más allá de lo que podemos percibir, intuir y, probablemente, imaginar.

Así pues, la gravedad es el denominador común, el hilo con el que enhebramos nuestros episodios.

Hay un tercer elemento que también consideramos a la hora de seleccionar el contenido de estas páginas: el factor cosquilleo, la sensación de que algo va a pasar pronto. Las historias que vertebran este libro hacen referencia a algunas de las áreas más «calientes» de la astrofísica actual, y muestran que cada vez se estrecha más el cerco en torno a algunas de esas preguntas que tocan los pilares del conocimiento humano. Desde múltiples frentes —la observación astrofísica, la física de partículas, la física teórica—, los científicos y las científicas están embarcándose ahora en proyectos y experimentos que demandan un grado de precisión inimaginable hace pocos años. La posibilidad de que sus resultados acaben cambiando de modo drástico nuestra visión del cosmos es muy real.

Con todos estos criterios —valor científico del problema, gravedad como protagonista, «temperatura» del área—, seleccionamos nuestras escenas narrativas y empezamos a trabajar. Y entonces… estalló la supernova. La escritura de la primera edición de este libro coincidió con el anuncio de uno de los logros más ansiados de la física moderna: la primera detección directa de ondas gravitacionales. Nosotros, como el hipotético observador del principio —supongamos que es una observadora, quizás Jocelyn Bell, la joven descubridora de los púlsares —, también reaccionamos contactando con quienes protagonizaron los hallazgos. Contagiados de su emoción, el impulso de contar sus descubrimientos en tiempo real nos surgió de manera espontánea.

Eso fue en 2016. Y podemos asegurar que el tiempo no ha pasado en balde. Las sorpresas han ido a más, las regalías científicas no dejan de llegar. LIGO ha seguido funcionando como sensor de los temblores del espacio-tiempo, abriendo para los humanos un nuevo sentido con que observar el universo. Ha detectado ya numerosas colisiones de agujeros negros, e incluso de estrellas de neutrones. La astronomía de ondas gravitacionales nos está desvelando un aspecto de la realidad tan distinto de lo cotidiano que imaginarlo exige una mente flexible y creativa.

Y hay que reconocer que la astrofísica clásica, la que caza fotones —radiación electromagnética, o sea, luz—, no se ha quedado atrás en cuanto a sorpresas. En un esfuerzo planetario, auténticamente global, decenas de telescopios trabajando de manera coordinada han logrado obtener la primera imagen de un agujero negro. Parece un contrasentido, puesto que cabría pensar que un objeto que se traga la luz es, por definición, imposible de fotografiar. Pero sí, con ingenio y tesón ha sido posible burlar ese pequeño detalle.

Cada capítulo del libro cuenta una historia, con su planteamiento, su nudo y su… Bueno, no siempre hay desenlace. Hablamos de investigación, y la investigación es un trabajo en curso; las respuestas siempre generan nuevas preguntas, así que se hace camino al andar y, a veces, parece que el objetivo definido al inicio del viaje se desdibuja. Lo que nunca falta —garantizado— es emoción, curiosidad y perseverancia en la búsqueda.

Empezamos, por supuesto, hablando de la gravedad, de cómo Aristóteles se equivocó con ella y de por qué aún hoy muchos de nosotros seguimos anclados en el erróneo pensamiento aristotélico, a pesar de que hemos tenido veinticuatro siglos para enmendarnos, además de la inestimable ayuda de Galileo, Newton y Einstein. En el segundo capítulo contamos una cacería, la de la llamada materia oscura; una cacería o más bien una carrera, en la que compiten miles

de investigadores de todo el mundo y que ahora entra en fase de esprint. Seguimos, en el tercer capítulo, con agujeros negros: esos objetos que nacieron para la física primero sobre el papel, como resultados matemáticos, de padres que los consideraron demasiado extraños para ser reales; hoy se estima que hay miles de ellos solo en nuestra galaxia.

La siguiente escena supone otra vuelta de tuerca en cuanto a lo de superar a la ficción. Los temblores en el espacio-tiempo detectados por LIGO fueron provocados por la fusión de dos agujeros negros, un suceso acaecido a más de mil millones de años luz de distancia y que en una fracción de segundo liberó cincuenta veces más energía que la que emiten todas las estrellas del universo observable.

Los últimos capítulos miran al futuro. En uno hablamos de qué nos depara la astronomía de ondas gravitacionales cuando sea posible detectarlas desde el espacio, con misiones espaciales tremendamente complejas: satélites volando en formación pero separados un millón de kilómetros entre sí, y a la vez conectados con un haz láser. También contamos cómo compiten unos cuantos telescopios dispuestos por todo el planeta por detectar las ondas gravitacionales que muy probablemente se generaron instantes después de que empezara la expansión del universo.

Para el final hemos dejado los aspectos más especulativos, fantasiosos y evocadores de la investigación en el «universo gravitacional»: ¿permite un espacio-tiempo que se curva y se agujerea los viajes en el tiempo?

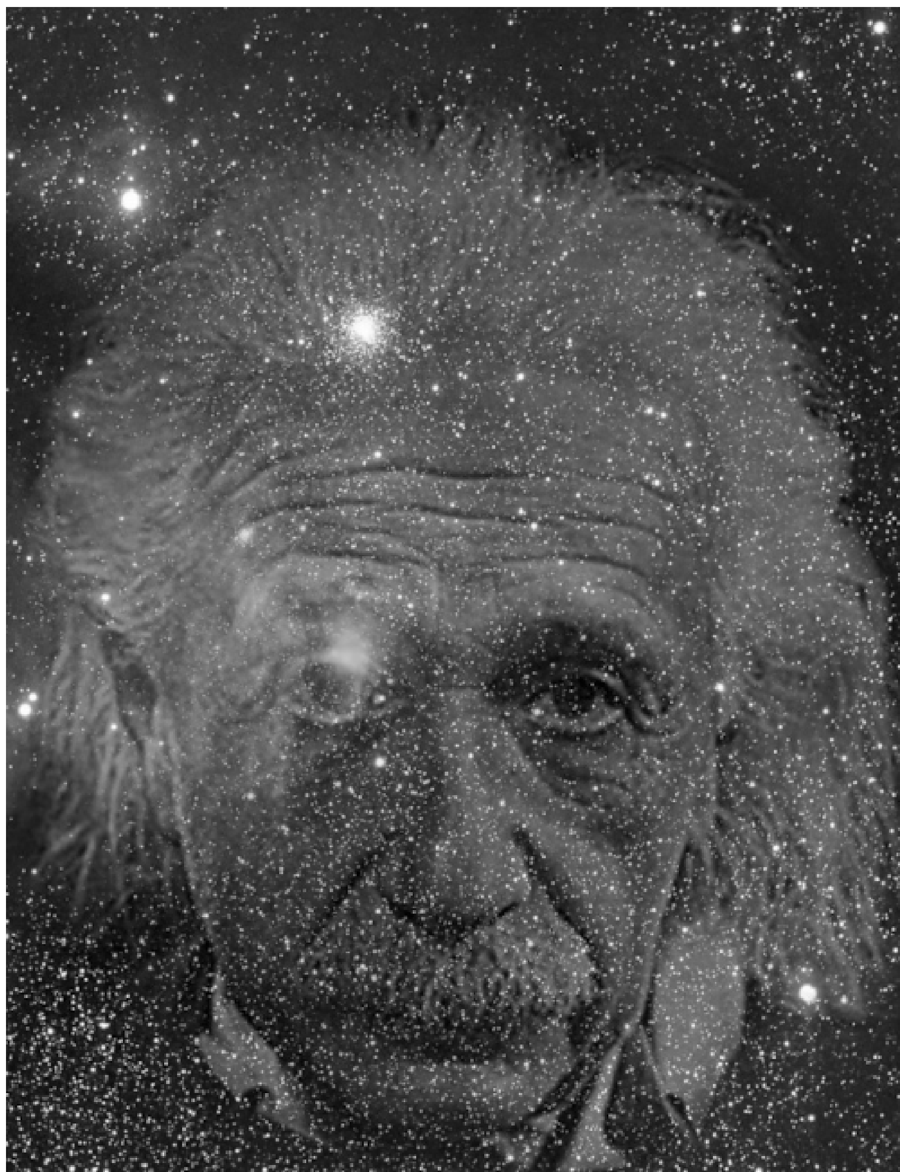
En todas estas escenas de la investigación astrofísica de vanguardia hemos contado con las voces de los auténticos protagonistas, los científicos. Cada capítulo contiene una historia principal construida en su mayor parte por Mónica, con la ayuda de entrevistas a investigadores e investigadoras de primera fila internacional. La mayor parte de los recuadros que apuntalan la historia central son obra de Ángel. Ambos os deseamos una feliz lectura.

Capítulo 1

Gravedad

Empecemos con una afirmación arriesgada: la ignorancia es maravillosa. Pero ¡calma!, enseguida acotamos: es maravillosa… mientras deje espacio suficiente para hacerse preguntas. Hace unos años uno de nosotros —Mónica— formó parte del equipo de guionistas de un vídeo cuyo objetivo era explicar conceptos básicos de astronomía, en concreto, el principio según el cual cuando se observa cualquier cuerpo celeste se está retrocediendo al pasado. Ya saben: la luz que llega de ese objeto necesita un tiempo para viajar hasta la Tierra, un tiempo que varía, lógicamente, en función de la distancia que debe recorrer. Si la galaxia vecina Andrómeda está a 2,5 millones de años luz de distancia, nosotros la veremos siempre «como era» hace 2,5 millones de años. «Nada» hay en el universo capaz de viajar más rápido que la luz; bien podría ocurrir en Andrómeda ahora mismo el mayor cataclismo cósmico, que nosotros no nos enteraríamos. Solo la vida inteligente que (acaso) quedase en la Tierra dentro de 2,5 millones de años tendría noticias de esta hipotética catástrofe andromediana. El hecho es que los guionistas pensamos en usar como ejemplo nuestro propio Sol, que está a unos ocho minutos luz de distancia. Y entonces alguien del equipo tuvo una idea: si de repente se apagara el Sol, tardaríamos nada menos que ocho minutos en enterarnos. Ocho minutos «extra», ocho minutos en que la vida sigue como si tal cosa, sin saber que todo se ha terminado. ¡Qué buen arranque para un corto! Pero ¡alto ahí! —dijo alguien, interrumpiendo el momento de ensoñación del resto—: ¿estamos hablando de que se «apaga» el Sol o de que «desaparece» el Sol? Porque… no es lo mismo.

No, ciertamente no es lo mismo.



Albert Einstein y su teoría de la relatividad cambiaron nuestra concepción de la gravedad.

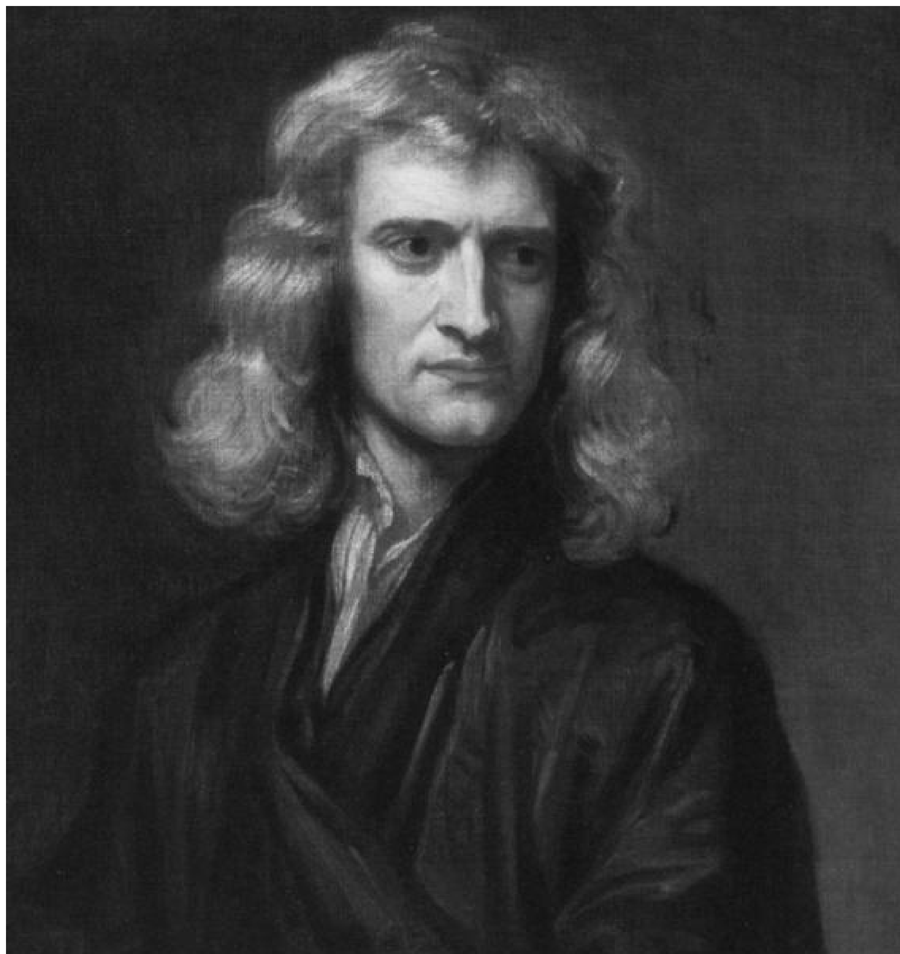
La tormenta de ideas derivó entonces hacia lo que ocurriría si el Sol de repente dejara de existir —un caos en el sistema solar más propio de una superproducción de Hollywood que de un modesto vídeo divulgativo— y, más importante aún, hacia la pregunta de cuánto tardaría en notarse el efecto en la Tierra. ¿Tardarían también ocho minutos en percibirse los efectos de la «desaparición» del Sol? La ignorancia nos regaló a todos no solo ese rato de lluvia de hipótesis, sino también la curiosidad de buscar la respuesta.

Que resultó ser enormemente reveladora.

Mucho antes que nosotros, también Albert Einstein —ni más ni menos—, se había hecho esa misma pregunta. Y se dio cuenta de que lo que debía ser la respuesta correcta, según su recién enunciada teoría de la relatividad especial, no encajaba en absoluto con la respuesta que daba la teoría que llevaba más de dos siglos funcionando con casi total perfección, la ley de la gravitación universal de Newton. Nuestra ingenua pregunta sobre los efectos de la desaparición del Sol había sido el hilo del que Einstein había tirado para llegar a su teoría general de la relatividad —cuando lo supimos no pudimos evitar un silencioso «¡Ohhhhhhh!» mental—.

Lo que puso a Einstein sobre la pista fue una reflexión sobre algo llamado «acción a distancia». La vida en las ciudades del siglo XXI está plagada de cotidianas «acciones a distancia»: radios, televisiones y, por supuesto, móviles funcionan sin aparente conexión a nada; solo la confianza en que alguien sabe realmente cómo lo hacen nos impide a la mayoría considerarlos objetos mágicos. Pero hubo un tiempo en el que a la gente sí le intrigaba que cuerpos distantes y aparentemente inconexos se influyeran mutuamente. En el siglo XXVII Isaac Newton pensó sobre ello y, en concreto, para el caso de la atracción gravitacional entre dos cuerpos, no halló una explicación satisfactoria.

Esto no le impidió encontrar la fórmula que aún hoy se usa con enorme éxito —casi siempre— para describir cómo funciona la gravedad. Fue Newton quien se dio cuenta de que la fuerza que hace caer las manzanas de los árboles es también la que rige el movimiento de los astros. En 1687, en su libro *Philosophiae naturalis principia mathematica*, Newton enunció su ley de la gravitación universal, que establece que el valor de esta fuerza solo depende de las masas de los cuerpos y la distancia que los separa. Es, como hemos dicho antes, una fórmula que funciona muy bien y que permite, por tanto, «manejar» la gravedad a la perfección en la vida cotidiana —hay una excepción en la vida cotidiana del siglo XXI, no en la del tiempo de Newton, a menos que se considere cotidiano observar a Mercurio; véase la explicación sobre relatividad y GPS en el capítulo «Túneles en el espacio… y en el tiempo»—. La justamente alabada aportación de Newton es lo que Brian Greene en *El universo elegante*[1] llama un «manual de usuario» de la gravedad: «unas instrucciones que los físicos, los astrónomos y los ingenieros han aprovechado con éxito para trazar la trayectoria de las naves espaciales que van a la Luna […], también para predecir los eclipses solares y lunares, el movimiento de los cometas, etcétera».



Retrato de Isaac Newton realizado a partir de la obra de Godfrey Kneller en 1689.

Pero, como ocurre con toda revolución, los efectos de la ley de la gravitación universal de Newton no fueron inmediatos. Desde que vieran la luz los *Principia* en 1687, la demostración matemática de que todos los movimientos celestes se deben a la gravitación se convirtió en una de las tareas fundamentales de los astrónomos. Uno de los primeros en ponerse a ello fue el impulsor de la publicación de los Principia, Edmond Halley.

Si Newton estaba en lo correcto, y los cometas se encontraban sujetos como el resto de los astros a la ley de la gravitación, uno que diese la vuelta al Sol seguiría alguno de los tres tipos de órbitas posibles: elíptica, parabólica o hiperbólica. En cualquiera de las dos últimas, el cometa se alejaría del Sol para siempre, mientras que en la primera, la elíptica, seguiría una órbita cerrada y, por tanto, tendría un período y regresaría. Así, sus sucesivas apariciones estarían

separadas por intervalos de tiempo parecidos y, además, en cada una de ellas, el cometa mostraría una órbita similar.

Halley estaba convencido de que estos cuerpos celestes podían ser periódicos, y buscó en los registros históricos disponibles cometas cuyas órbitas fuesen similares. El candidato fue el reciente cometa de 1682: Halley comprobó que su órbita era retrógrada, esto es, que se mueve en sentido opuesto a la dirección de traslación de los planetas en torno al Sol, y resultó que los cometas observados en los años 1531 y 1607 también poseían órbitas retrógradas. El sagaz astrónomo investigó más en detalle estos tres registros, y halló que tenían casi todo en común, por lo que dedujo que podría tratarse del mismo cuerpo, y en 1695 le contó a Newton sus suposiciones. Sin embargo, el intervalo entre las apariciones no era exactamente el mismo. Halley pensó de forma acertada que la influencia gravitacional de planetas como Júpiter o Saturno podía alterar los parámetros orbitales del cometa haciendo que su período variase alargándose o acortándose respecto del valor medio. Calculó así que regresaría a finales de 1758 o principios de 1759.

Halley murió en 1742, y Newton mucho antes, en 1727, por lo que ninguno vivió para comprobar la validez de este pronóstico basado en la teoría de la gravitación. No fue hasta 1757, un año antes del previsto retorno del cometa, que astrónomos franceses volvieron a rehacer los cálculos de Halley. Según ellos, llegaría a su punto más cercano al Sol o perihelio a mediados de abril de 1759. Por fin, el día de Navidad de 1758, un astrónomo alemán aficionado observó el cometa por vez primera en su pronosticado regreso. Este alcanzó el perihelio el 13 de marzo de 1759. Las características de su órbita mostraron que era casi idéntica a las de los cometas de 1531, 1607 y 1682: los cuatro eran el mismo objeto. Halley, en honor de quien el cometa recibiría su nombre, estaba en lo cierto, y de este modo la atracción gravitacional newtoniana recibía una clamorosa confirmación empírica.

Con todo, Newton no explicó la naturaleza de la gravedad, el porqué de su existencia. No entendía cómo se producía la acción a distancia. El historiador de la ciencia José Manuel Sánchez Ron, en el libro *Albert Einstein. Su vida, su obra y su mundo* [2] recoge una carta enviada por Newton en 1692 a Richard Bentley:

> Es inconcebible que la materia bruta inanimada opere y afecte (sin la mediación de otra cosa que no sea material) sobre otra materia sin contacto bruto, como debe ser si la gravitación en el sentido de Epicuro es esencial e inherente a ella […]. Que la gravedad sea innata, inherente y esencial a la materia de forma que un cuerpo pueda actuar a distancia a través del vacío

> sin la mediación de otra cosa […] es para mí algo tan absurdo que no creo que pueda caer en ella ninguna persona con facultades competentes de pensamiento en asuntos filosóficos[…].

Sánchez Ron interpreta que «Newton no creía realmente en las acciones a distancia, pero era suficiente buen científico como para no renunciar a un instrumento conceptual que mostraba su valor predictivo o, lo que es lo mismo, científico. Otra cosa es lo que él pensase, sin poderlo demostrar».

Y ya que estamos hablando de Newton, hagamos un inciso. ¿De verdad se inspiró para pensar en la gravedad cuando una manzana le cayó en la cabeza? Lo del golpe quedará para las viñetas, pero en 2010 la Royal Society británica —la sociedad científica más antigua— conmemoró el 350 aniversario de su fundación publicando *urbi et orbi* —o sea, en internet— el manuscrito de 1752 en el que William Stukeley narra la biografía de Newton, mantenido hasta entonces en los archivos de la institución, apartado de los ojos del mundo. Esto es lo que cuentan las *Memorias de la vida de sir Isaac Newton*:

> Tras la cena [el 15 de abril de 1726], con clima agradable, salimos al jardín él [Newton] y yo a tomar el té a la sombra de unos manzanos. En la conversación me dijo que estaba en la misma situación que cuando le vino a la mente por primera vez la idea de la gravitación. La originó la caída de una manzana, mientras estaba sentado, reflexionando. Pensó para sí: ¿por qué tiene que caer la manzana siempre perpendicularmente al suelo? ¿Por qué no cae hacia arriba o hacia un lado, y no siempre hacia el centro de la Tierra? La razón tiene que ser que la Tierra la atrae. Debe de haber una fuerza de atracción en la materia; y la suma de la fuerza de atracción de la materia de la Tierra debe de estar en el centro de la Tierra, y no en otro lado. Por esto la manzana cae perpendicularmente, hacia el centro. Por tanto, si la materia atrae a la materia, debe de ser en proporción a su cantidad [la masa]. La manzana atrae a la Tierra tanto como la Tierra atrae a la manzana. Hay una fuerza, la que aquí llamamos gravedad, que se extiende por todo el universo.

Pero volvamos a lo que incomodó a Einstein en el caso del Sol desaparecido. El modelo de Newton consideraba la gravedad una fuerza de atracción inherente a la propia masa que —aquí viene lo importante— actúa «instantáneamente». En la ley de la gravitación universal la atracción gravitacional depende solo de la magnitud de las masas implicadas y de la distancia, pero no del tiempo. Eso significa que si la distancia entre los cuerpos cambia, los efectos son inmediatos. Es decir, si el Sol se desvaneciera de repente, las consecuencias se percibirían en la Tierra al instante —adiós a los ocho minutos de gracia—.

El problema de Einstein es que, con la relatividad especial en la

mano, es del todo imposible saltarse los ocho minutos. Su teoría determina que en este universo no hay manera de transmitir nada, ni información ni perturbación alguna, a velocidad mayor que la de la luz: según la relatividad especial, la Tierra seguiría en su órbita sus ocho tranquilos minutos, lo que tarda en llegar la debacle.

Los cien años transcurridos desde que Einstein resolviera el entuerto, con su teoría de la relatividad general, han dado de sobra para demostrar que él tenía razón. Y así, fantaseando con la alocada idea de la desaparición del Sol, Einstein fue un paso más allá que Newton y logró explicar qué es realmente lo que nosotros percibimos como fuerza de gravedad, cambiando de pasada nuestra visión de qué es el sustrato donde sucede nuestra realidad, qué es el espacio-tiempo.

Y ahora, ¡en la Luna!

Por supuesto, Newton y Einstein no fueron los primeros en pensar acerca de qué es la gravedad. Un relato de la investigación sobre la gravedad con cierto orden cronológico podría empezar en el siglo IV antes de Cristo, cuando Aristóteles decidió que el movimiento de los cuerpos estaba relacionado con su naturaleza. Los cuerpos pesados, decía Aristóteles, tienden a desplazarse hacia el centro del universo porque es lo que les corresponde, por su naturaleza. Y no vale reírse de la idea. El modelo aristotélico no solo se mantuvo vigente durante veinte siglos, sino que, aún hoy, cualquiera que no haya pasado por una máquina anuladora de la intuición responderá a determinadas preguntas igual que lo hizo —erróneamente— Aristóteles.

Por ejemplo, a esta pregunta: en un cubículo sin aire, donde la única fuerza que actúa sobre los objetos es la gravedad, ¿qué cae más rápido, una pluma o una bola de plomo? Aristóteles decía que la velocidad a la que caen los cuerpos varía en función de su peso: la bola de plomo llega antes al suelo porque así lo dicta su naturaleza.

Falso. Para demostrar que no es así hubo que esperar hasta el siglo XVII, cuando entra en escena Galileo Galilei (1564-1642), el sabio florentino inventor del método científico. Como en el caso de la manzana de Newton, la imagen mental de Galileo subiendo escaleras arriba por la torre de Pisa para lanzar objetos se ha invocado tanto que es fácil darla por cierta. Según los historiadores de la ciencia, sin embargo, Galileo no hizo ningún experimento parecido —aunque sí lo pensara—. Desde la torre, los objetos caerían demasiado rápido como para medir el tiempo de llegada con los rudimentarios métodos de la época. Lo que sí hizo Galileo fue encargar la construcción de un plano inclinado de unos siete metros de largo, por donde lanzaba distintas bolas; para medir el tiempo que tardaban en bajar por el tablón, el

científico usaba métodos que le permitían una precisión próxima a la centésima de segundo —uno de sus «relojes» consistía en tocar el laúd a la vez que las bolas se movían y marcar el lugar de la partitura en que se encontrara cuando se paraban—.

Galileo descubrió así experimentalmente que, si sobre los cuerpos solo actúa la gravedad, todos caen igual de rápido: pluma y bola de plomo tocan el suelo a la vez. Es algo tan contrario a la experiencia cotidiana —en la que el rozamiento con el aire frena los objetos ligeros— que es difícil no sorprenderse ante el vídeo grabado en la Luna en 1971, durante la misión del Apolo 15, en el que el astronauta de la NASA David Scott deja caer una pluma de halcón —por su módulo de aterrizaje lunar, el Falcon— y un martillo: «¡Ahí lo tenéis! ¡Parece que Galileo tenía razón!», exclama Scott cuando ambos objetos tocan a la vez la superficie del satélite.

El asunto es importante, porque ayuda a diferenciar peso y masa. El peso se refiere a la fuerza de atracción de la Tierra sobre un objeto; en la Luna, más pequeña que la Tierra y, por tanto, capaz de ejercer una menor fuerza gravitacional, todo pesa menos que en la Tierra. La masa es una característica propia de cada cuerpo, y tiene que ver con la resistencia que opone ante algo que la empuja. Ese algo puede ser la gravedad terrestre, pero también otra fuerza. En la Estación Espacial Internacional todo flota porque no se percibe el efecto de la gravedad terrestre y, sin embargo, si un astronauta quiere que un objeto llegue al otro lado de la nave debe igualmente empujarlo; es más, tendrá que empujar más fuerte los cuerpos con más masa, aunque todo esté flotando y, por tanto, no «pesen» nada.

En cualquier caso, a partir de Galileo el estudio del movimiento de los cuerpos se convirtió en lo que hoy llamaríamos un área caliente de la ciencia. La siguiente parada cronológica en la historia del pensamiento sobre la gravedad podría hablar del filósofo y matemático francés René Descartes (1596-1650), quien defendía que el universo estaba ocupado completamente por una especie de «materia» o «éter» invisible cuyos movimientos causaban vórtices. Para Descartes todos los cuerpos celestes tenían sus vórtices asociados: el Sol, el vórtice solar, que determinaba la órbita de los planetas; la Tierra, el vórtice terrestre, que arrastraba en torno a sí a la Luna, y así el resto de los astros del universo, que, por otra parte, era para Descartes infinito. Esos vórtices estaban causados por la inercia —cuya existencia también teorizó el filósofo— que Dios impuso al dotar al cosmos de movimiento. La idea, usada ya por los pensadores griegos, se inspiraba en los remolinos de un río.

Seguramente la principal aportación del modelo de vórtices al

conocimiento humano es haber estimulado el pensamiento de Newton. Isaac Newton (1643-1727) encontraba confusa la teoría de los vórtices de Descartes. En 1679, durante un largo período de aislamiento personal, Newton —considerado ya uno de los grandes sabios de la época— recibió una carta que le ayudaría a definir su teoría de las causas del movimiento. En ella, el secretario de la recientemente fundada Royal Society, Robert Hooke, le planteaba cuestiones de mecánica y atracción; preguntaba sobre la fuerza de atracción que ejercía el Sol sobre los planetas, o la Tierra sobre la Luna, y en particular sobre cómo esta fuerza cambiaba según la distancia. Hooke ya había hallado que la fuerza era menor cuanto más lejos estuvieran los cuerpos implicados, pero no había podido averiguar en qué proporción. Newton sí consiguió hacerlo: corroboró las suposiciones del secretario de la Royal Society y descubrió que la fuerza de atracción entre un planeta y el Sol era inversamente proporcional al cuadrado de su distancia, y directamente proporcional a las masas de ambos cuerpos.

Hoy un hallazgo así tendría que ser publicado cuanto antes en una revista científica, pero no en el tiempo de Newton, quien lo guardó para sí. Fue el astrónomo de la Royal Society Edmond Halley (1656-1742), amigo de Newton, quien logró la publicación del trabajo. En 1684, años después de la correspondencia con Hooke, Halley visitó a Newton para preguntarle precisamente de qué tipo debía ser la curva que recorren los planetas si el trabajo realizado por Hooke hasta entonces —el único que conocía Halley— era correcto. Newton le respondió inmediatamente: elíptica. La diplomacia y la capacidad de convicción de Halley, así como su perspicacia acerca de la importancia de esa revelación, convencieron a Newton para que publicase sus investigaciones sobre el movimiento planetario. Esa fue la génesis de *Philosophiae naturalis principia mathematica*, considerada una de las obras cumbre del pensamiento científico humano.

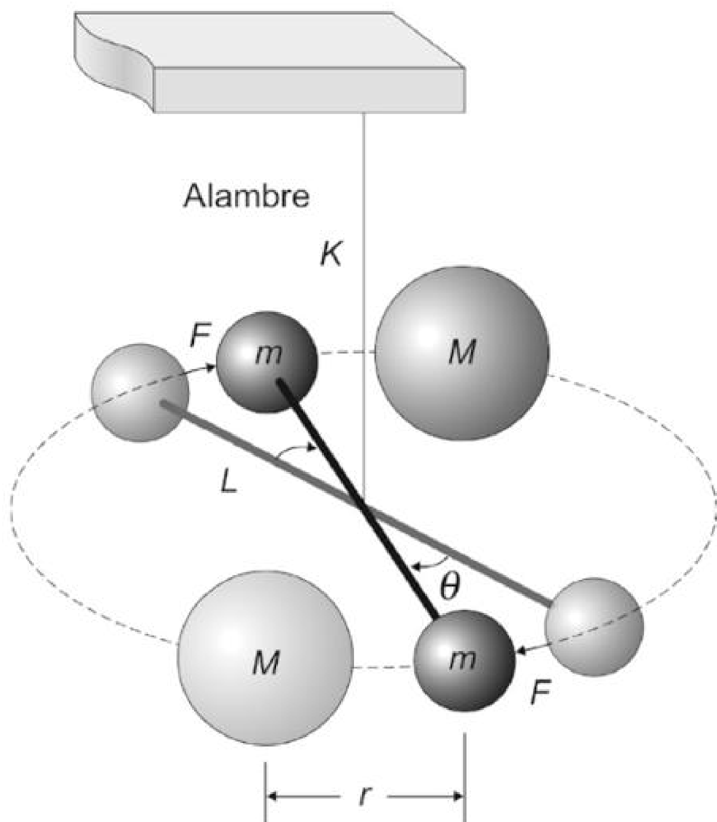
Su núcleo central son las tres leyes del movimiento, o mecánica newtoniana. En el libro III de los *Principia*, Newton expone su ley de la gravitación universal, en la que la mayor revolución conceptual consiste en contemplar como la misma fuerza aquella que mueve los planetas y aquella que hace que un cuerpo caiga al suelo y, en especial, que esta fuerza de gravedad se ejerce a distancia, sin necesidad de un medio que la transmita, algo que supuso la demolición del sistema de vórtices cartesianos.

Relatividad

La siguiente parada cronológica nos lleva ya a Albert Einstein.

Aunque, por puro gusto, se puede hacer un breve descanso en el físico británico Henry Cavendish (1731-1810). Lo que este nos ofrece es un famoso experimento que tenía por objetivo nada menos que medir la densidad del planeta Tierra; esto nos da una idea de lo enormemente precisas que debían de ser, ya en el siglo XVIII, las medidas en esta área de investigación —en el siglo XXI, como se verá en los capítulos «Crónica de un descubrimiento anunciado» y «Los sensores gravitacionales del futuro», estudiar la gravedad implica medir distancias mucho más pequeñas que el diámetro de un protón—.

Cavendish decía que quería «pesar el mundo» —su trabajo, publicado en la revista *Philosophical Transactions* de la Royal Society, se titula «Experiments to Determine the Density of the Earth»—. Para ello diseñó un aparato con el que medir la atracción que ejercían unas esferas muy pesadas sobre otras más pequeñas, que permanecían suspendidas de una varilla en una balanza especial. Cambiando de lado las esferas pesadas, pero manteniéndolas siempre cerca de la esfera suspendida, Cavendish pudo medir el movimiento que inducían las unas en la otra. En concreto, Cavendish medía el ángulo de giro de la varilla y lo relacionaba con la fuerza de torsión de un alambre del que colgaba la balanza. Habiendo determinado la fuerza de atracción entre las esferas, y conociendo la que ejerce la Tierra sobre ellas —su peso—, Cavendish podía saber cuánto más masiva era la Tierra que las esferas. Con este valor y el radio de la Tierra —ya conocido entonces — dedujo que la densidad de la Tierra era unas 5,4 veces mayor que la del agua.



Esquema del experimento de Cavendish.

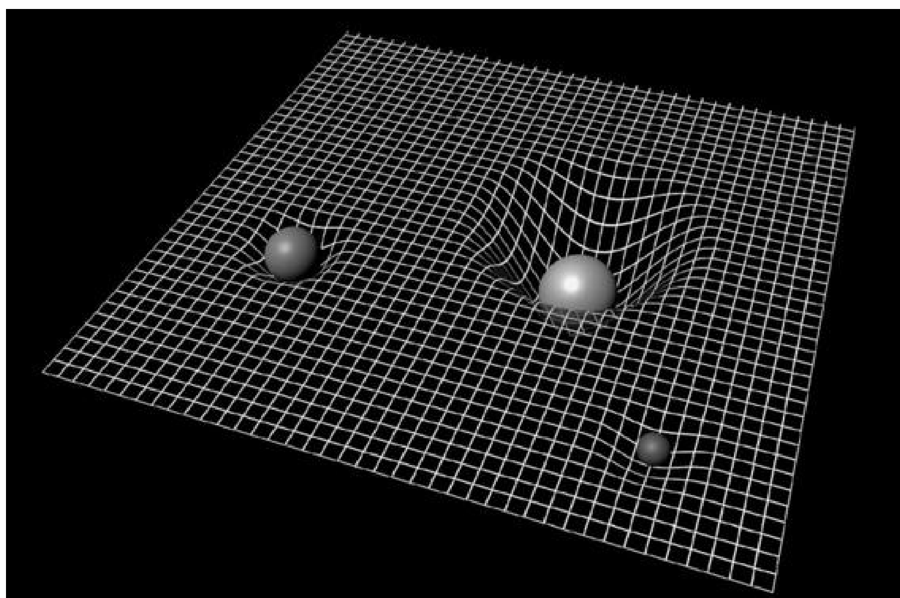
El experimento se ha hecho famoso por su gran sensibilidad. Para evitar la influencia de corrientes de aire o cambios de temperatura, aisló su equipo cuanto pudo en un cubículo de madera de varios metros de alto y ancho metido en un cobertizo; el movimiento de la varilla lo observaba desde fuera, con telescopios insertos en agujeros en las paredes de la caja, y llegaba así a medir cambios de posición de 0,2 milímetros. Nada mal, para la época.

Y ahora sí: Einstein.

A Einstein lo dejamos convencido de que la gravedad no puede actuar de manera instantánea. Tuvo varias ideas brillantes después de ese momento. En especial, una en 1907, una que el propio Einstein describió como su «idea más feliz»: «Estaba sentado en la oficina de patentes de Berna cuando de repente pensé: "Si una persona sufre una caída libre, no siente su propio peso". Estaba paralizado. Esta reflexión tan simple me condujo a una teoría de la gravitación».

La teoría de la relatividad general, que por primera vez explica la naturaleza de la gravedad, nace de la idea de que el movimiento acelerado y la gravedad están profundamente interrelacionados, hasta el punto de que su efecto puede ser indistinguible. Ese pensamiento iluminador fue seguido por ocho años de trabajo duro, y en 1915 Einstein llegó a la que llamaría la «teoría de la relatividad general».

En esencia, la teoría describe cómo el espacio-tiempo se ve afectado por los campos gravitacionales de la materia, o lo que es lo mismo, que la geometría del espacio-tiempo se curva en presencia de la gravedad. La analogía más usada, no perfecta pero útil, para tratar de visualizar qué es la gravedad, es la que equipara el espacio-tiempo a un tejido elástico, flexible, que contiene todos los objetos del cosmos; cuanto más masivo el objeto, más se deforma el tejido. Como explica Greene: «según esta propuesta radical el espacio no es meramente un escenario pasivo que proporciona el marco para los acontecimientos del universo, sino que la forma de ese espacio responde a los objetos que están en su entorno».



Analogía bidimensional de la deformación del espacio-tiempo por los campos gravitacionales.

Así, es la curvatura del espacio-tiempo la que define el movimiento de los astros. En feliz expresión del fisico teórico John Wheeler —también padre de los términos agujero negro y agujero de gusano, que aparecen en el capítulo «Túneles en el tiempo… y en el espacio»—, «la masa le dice al espacio cómo curvarse, el espacio le dice a la masa

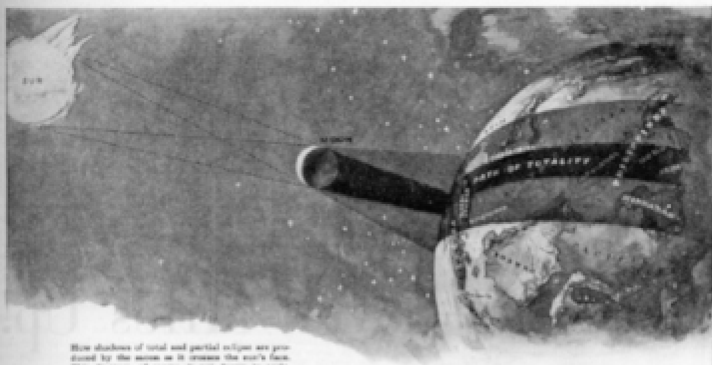
cómo moverse». Y, por tanto, la relatividad general sustituye a la clásica gravitación universal de Newton. Aunque no es una sustitución completa, porque la ley de Newton sigue siendo el perfecto manual de instrucciones para «andar por casa». Sus lagunas, las situaciones en que la ley de Newton no vale, solo se dan en presencia de campos gravitacionales muy intensos, como los existentes en estrellas de neutrones o agujeros negros, o si las mediciones se realizan de una manera muy precisa.

La teoría de la relatividad general se presentó en la Academia Prusiana de Ciencias, en Berlín, en noviembre de 1915. Pero para el mundo no científico el verdadero hito fue su demostración, en 1919.

Esta teoría predice que también la luz se curva en un campo gravitacional; enseguida se pensó, por tanto, que los rayos de luz que pasasen al lado del Sol cambiarían su trayectoria debido a la influencia de su gravedad. Así, las estrellas, cuya imagen vemos aparentemente fija en la bóveda celeste, aparecerían desplazadas por el efecto del campo gravitacional del Sol en posiciones diferentes a las que ocupan en realidad. Sin embargo, eso no se puede comprobar normalmente, ya que el brillo del Sol impide observar los astros que están cerca de él en el cielo. Solo se podrá observar este fenómeno durante los eclipses totales de Sol, ya que es entonces cuando se hacen visibles las estrellas próximas al disco solar mientras este es ocultado por la Luna.

Nada más publicar Einstein su nueva teoría, se sugirió la posibilidad de comprobarla durante un eclipse total de Sol, señalándose el que tuvo lugar en 1919 como la oportunidad ideal, ya que el Sol se encontraría sobre las estrellas del cúmulo de las Híades, en la constelación del Toro. Las observaciones mostraron, efectivamente, un desplazamiento en la imagen de las estrellas que coincidía aproximadamente —con un margen de error de un 5 %— con las predicciones teóricas de Einstein. En noviembre de 1919 se anunció que los resultados obtenidos constituían la primera confirmación de la teoría de la relatividad general —le seguirían otras muchas, a lo largo de ese siglo—.

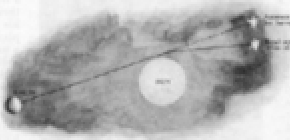
MAY, 1929 POPULAR SCIENCE MONTHLY



Eclipse to Check Einstein

Astronomers Journey Halfway Around the World to Study Five-Minute Spectacle, as the Moon Blots the Sun's Face

By GEORGE LEE DOWD, JR.



Artículo publicado en la revista Popular Science de mayo de 1929, sobre el uso de los eclipses totales de Sol para comprobar la predicción de la deflexión de la luz en la teoría de la relatividad general de Einstein.

Einstein se hizo famoso de la noche a la mañana. El 10 de noviembre de 1919, *The New York Times* titulaba en portada: «La luz [de los astros] está torcida en los cielos. Los científicos, emocionados con las observaciones del eclipse. Triunfo de la teoría de Einstein. Las estrellas no están donde parecían estar, o donde se calculaba. Pero no hay nada de qué preocuparse».

La teoría general de la relatividad, a través de su explicación de qué es realmente la gravedad, cambió la visión de qué es el espacio-

tiempo. Demostró que el equipamiento sensorial que los humanos llevamos incorporado «de serie», y en el que se basa nuestra intuición, es muy limitado: para entender el universo no queda más remedio que desarrollar instrumentos —tecnológicos, matemáticos— para llegar más allá, para ver más pequeño y más lejos, para ver distinto… para pensar distinto.

El físico teórico Juan García-Bellido Capdevila cuenta de esta manera su experiencia:

> La intuición es una reacción espontánea ante un estímulo, y está basada en nuestra experiencia. El bebé al que se le cae el vaso, o que lo tira, más bien. Cuando un científico se enfrenta a situaciones a las que no está acostumbrado, como las inmediaciones de un agujero negro, o de una estrella de neutrones… ¡no tiene esa experiencia, no ha podido construirse una intuición sobre eso! Lo que hacemos los científicos es recurrir a la matemática. La matemática nos da otro tipo de intuición. Nos da un puente, nos permite cruzar con la mente un puente de cristal sobre un precipicio, pero sabiendo que al otro lado hay tierra firme, porque hay experimentos que nos permiten confirmar que lo predicho es correcto. Cuando pasa eso, cuando la matemática te permite alcanzar algo que está lejos de tu experiencia, y además lo compruebas, eso… ¡da una alegría! Es verdaderamente emocionante.

Capítulo 2

La gravedad del lado oscuro

«En este momento ustedes y yo estamos siendo atravesados por miles de millones de partículas de materia oscura, nuestros cuerpos están bañados en materia oscura». La física italiana Elena Aprile recorre el escenario puntero en mano, moviendo los brazos como si quisiera tocar esa extraña sustancia invisible de la que habla, la materia oscura. Y sí, en realidad eso es lo que quiere hacer, «tocar» materia oscura. Pero no con sus manos, sino con el peculiarísimo experimento que dirige, que es la trampa de materia oscura más sofisticada jamás construida. Si Aprile logra su objetivo, será un hito que recogerán los libros de historia, los libros de física, los libros de texto… Muchos libros. Será el principio del fin de un misterio tan grande como todo el cosmos: ¿De «qué» está hecho el universo?

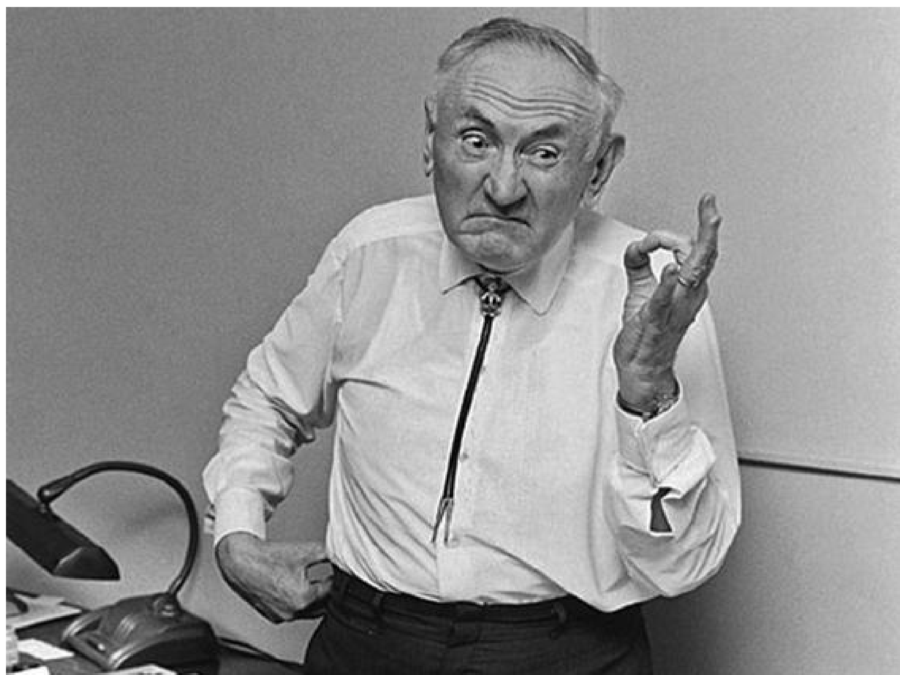
A la hora de enfrentarse a esta pregunta, la gravedad es un elemento fundamental. Para empezar, fue esta fuerza la que delató la existencia de la materia oscura. Hoy por hoy, apenas quedan dudas de que alrededor del 85 % de toda la materia que hay en el universo es «oscura», lo que quiere decir que apenas interacciona con la materia que conocemos: no emite ni absorbe luz, no tiene carga eléctrica… «No es como el resto de materia de que estamos hechos», dice Aprile. Sin embargo, sí ejerce atracción gravitacional. De hecho es precisamente la fuerza de la gravedad que ejerce esta materia invisible la que ha dirigido la formación de las galaxias, y de las aglomeraciones de galaxias, a lo largo de la evolución del universo.

Todo ello hace que el hecho de no saber todavía qué es esa materia oscura sea realmente «incómodo» —ese es el término que usan muchos físicos en este contexto—.

Una de las estrategias actualmente en marcha para tratar de averiguar la naturaleza de la materia oscura es intentar atraparla. Ese es el tema de la conferencia que esa tarde de 2015 imparte Aprile en Madrid. Su constante movimiento en el escenario transmite —deliberadamente o no— la excitación que vive la física actual. Esta investigadora italiana, discípula de una figura de la física reciente tan carismática como el premio Nobel Carlo Rubbia, no está, por supuesto, sola en su objetivo. La búsqueda de la materia oscura es «una auténtica carrera», dice ella, en la que compiten experimentos y detectores de distintos tipos, que da trabajo a decenas de miles de

científicos e ingenieros en todo el mundo y que genera tecnología enormemente diversa.

El origen del problema se remonta a los años treinta del siglo pasado. Los astrónomos sospechaban ya entonces que observar la materia que emite luz no es un buen método para estimar la masa contenida en las galaxias. El astrónomo suizo Fritz Zwicky, del Instituto de Tecnología de California (Caltech), Estados Unidos, fue el primero en sugerir la presencia de una «materia invisible» entre las galaxias.



El astrónomo Fritz Zwicky.

Zwicky estudiaba cómo se movían las galaxias dentro del cúmulo de Coma. Este cúmulo está formado por aproximadamente un millar de galaxias, agrupadas por su gravedad mutua. A diferencia de los planetas en nuestro sistema solar, sin embargo, las galaxias no orbitan en torno a un único objeto masivo como el Sol, sus órbitas son más complicadas.

Para llevar a cabo sus observaciones, Zwicky convenció a Caltech para construir un telescopio Schmidt de dieciocho pulgadas en el observatorio de Monte Wilson, con el fin de poder capturar un gran número de galaxias en una única fotografía de gran angular. El astrónomo usó este instrumento para realizar un estudio de todas las galaxias en el cúmulo de Coma, y medir el desplazamiento Doppler de

sus espectros para determinar sus velocidades. Como sabemos que la fuerza de gravedad es proporcional a la masa de los objetos involucrados, Zwicky fue capaz de calcular la masa total del cúmulo de Coma a partir de las velocidades de sus galaxias, llegando a la conclusión de que debía de contener una gran cantidad de materia no explicada por la luz de las estrellas. La llamó «materia oscura».

Las observaciones de Zwicky se llevaron a cabo poco después de que los astrónomos advirtieran que las galaxias son gigantescas agrupaciones de estrellas. Cuando Zwicky observó por primera vez el cúmulo de Coma, los físicos nucleares estaban empezando a desarrollar las teorías que explicarían el *big bang* y las supernovas. Y dado que las galaxias son objetos distantes y complejos, no es sorprendente que la comunidad científica no comenzara inmediatamente a preocuparse por el problema de la materia oscura.

En 1937 Zwicky escribía en *The Astrophysical Journal*:

> La determinación de las masas de las nebulosas extragalácticas es en la actualidad uno de los principales problemas de la astronomía. Hasta hace poco las masas de las nebulosas se estimaban bien a partir de su luminosidad, o bien a partir de su rotación interna. En este trabajo se mostrará que ambos métodos son poco fiables.

Llama la atención que Zwicky usaba aún el término «nebulosa» para referirse a cualquier objeto difuso. La razón es que, como hemos mencionado, hacía apenas una década que Edwin Hubble había descubierto que muchos de esos objetos eran en realidad galaxias como la nuestra.

Pese a las observaciones de este astrónomo, hubo que esperar bastante, hasta las medidas de velocidad de rotación de galaxias realizadas por Vera Rubin en los años setenta, para que la comunidad científica se tomara en serio la materia oscura. Rubin demostró que el «borde» real de las galaxias, su límite exterior —por llamarlo de alguna manera—, no coincide ni mucho menos con las estrellas brillantes más alejadas del centro: más allá, donde solo está oscuro, sigue habiendo materia.

En 1974 Rubin, de la Institución Carnegie de Washington, inició un estudio detallado del movimiento de las estrellas en la galaxia vecina de Andrómeda con la ayuda de su colega Kent Ford, que había desarrollado un espectrómetro —indispensable para medir velocidades de objetos celestes— muy sensible para la época. Rubin y Ford midieron la velocidad de las nubes de gas de hidrógeno en Andrómeda y sus alrededores. Ambos esperaban encontrar que fuera del borde visible de esta galaxia el gas se moviera más despacio que dentro de la

propia galaxia. Pero encontraron lo contrario: la velocidad orbital de las nubes de hidrógeno se mantenía constante fuera del borde observable. Concluyeron que más allá de los límites visibles de la galaxia tenía que haber más materia.

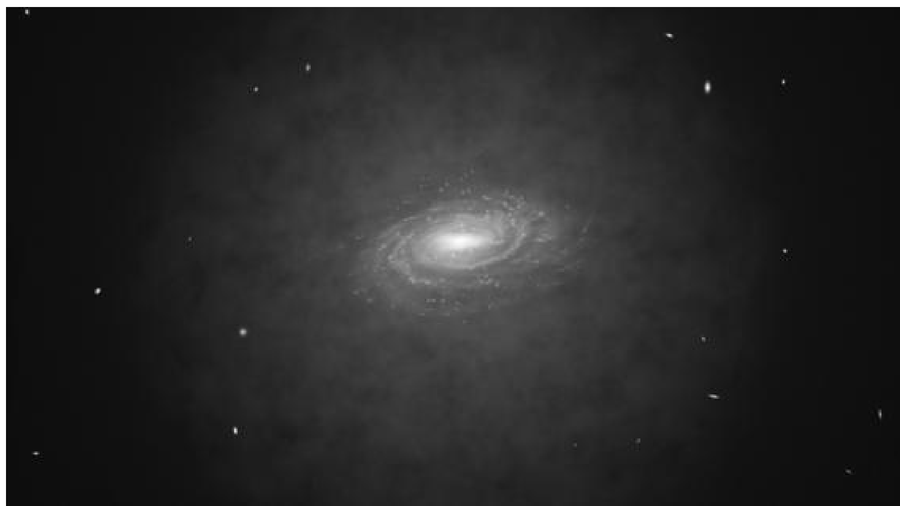
Si Andrómeda obedece las leyes de Newton, razonó Rubin, esta debe contener materia oscura, en cantidades que crecen al aumentar la distancia al centro galáctico. Sus datos, confirmados además por las observaciones de otras galaxias, los llevó a inferir que estas albergan grandes cantidades de materia oscura.



La astrónoma Vera Rubin ante una fotografía de sus años de juventud.

La confirmación de este hecho selló la reputación de Rubin como astrónoma, en una época en que serlo —astrónoma, en femenino— era una heroicidad. Valgan como muestra varios episodios de su vida académica. Tras graduarse en una universidad femenina en 1948 Rubin quiso hacer el doctorado en Princeton, pero no pudo ser, dado que esta universidad no aceptaba mujeres en su programa de astronomía —y así fue hasta 1975—. Se matriculó entonces en la

Universidad de Cornell. En 1951 había completado sus primeros trabajos sobre movimientos de galaxias, y el congreso en el que quería presentarlo se celebraba en fechas próximas al nacimiento de su primer hijo. Uno de los miembros de su departamento decidió, puesto que ella no podría ir, que él presentaría el trabajo y además lo firmaría como autor —Rubin rápidamente declaró que sí podía ir y, en efecto, dio su charla al poco de dar a luz—. Más tarde se trasladaría a la Universidad de Georgetown, donde hizo la tesis bajo la dirección de George Gamow.



Impresión artística del halo de materia oscura que rodea a nuestra galaxia, la Vía Láctea, representado en forma de una nube. En realidad es invisible.

Hoy se sabe, con un altísimo grado de certeza, que dado que la materia oscura es el tipo de materia predominante en el universo, su papel ha sido y es fundamental en la formación de las estructuras a gran escala: las galaxias, los cúmulos de galaxias y los supercúmulos de galaxias. Los cálculos indican que la gravedad atribuible a la materia que «brilla» —la materia del tipo que conocemos— no basta para mantener unidas las estrellas en las galaxias y las galaxias en los cúmulos de galaxias.

Como afirma Aprile,

> Sabemos que la materia oscura está ahí, sabemos de forma muy precisa que vivimos en un universo que es en gran medida desconocido para nosotros. Las estructuras que vemos en el universo se mantienen unidas gracias al pegamento de la materia oscura; la materia oscura es el esqueleto del universo, sin ella sería imposible formar galaxias, estrellas, planetas… ni la vida tal como la conocemos. Sin materia oscura no estaríamos aquí. Así de fundamental es el problema de la materia oscura. Como científicos, ¿cómo

podemos resistirnos a tratar de averiguar de qué está hecho el universo?

La trampa

Pese a que su existencia se considera demostrada, sigue sin saberse qué partícula elemental constituye la materia oscura. Los físicos barajan diversas candidatas —«Hay todo un zoo de partículas en las teorías», dirá Aprile—, cada una con sus peculiaridades. Entre las que suman más partidarios están las llamadas WIMP, un acrónimo en inglés traducible por «partícula masiva que interactúa débilmente con la materia».

Una de las trampas mejor equipadas para cazar WIMP es XENON1T, situado en el mayor laboratorio subterráneo del mundo, el Gran Sasso, en los montes Apeninos (Italia). Empezó a operar en 2016. Aprile coordina desde su puesto de catedrática de la Universidad de Columbia, en Nueva York, el equipo de unos 150 científicos procedentes de más de 20 instituciones de todo el mundo que integran XENON1T, y declara emocionada: «XENON1T abrirá una nueva era en la búsqueda de materia oscura porque es el primer experimento a gran escala de este tipo, 100 veces más sensible que sus predecesores. Y además empieza a funcionar en el momento perfecto: ahora realmente ha llegado la hora de salir a bailar».

El experimento se encuentra a 1400 metros de profundidad. Su aspecto no es muy sorprendente: un gran tanque cilíndrico blanco de 10 metros de alto y 10 metros de diámetro, junto a un edificio acristalado que alberga los equipos de control. El tanque contiene un depósito con 3,5 toneladas de xenón, rodeado de agua. A temperatura ambiente este elemento es un gas —por cierto muy escaso: solo hay una parte de xenón por cada 10 millones de partes de aire—, pero en el gran tanque blanco ha sido enfriado a unos 100 ºC bajo cero para licuarlo, estado en el que es tres veces más denso que el agua. En esencia, el principio de detección es relativamente sencillo: si una WIMP, al atravesar el tanque, choca con alguna de las partículas que forman el núcleo de los átomos de xenón, el detector traducirá la colisión en una señal luminosa característica.

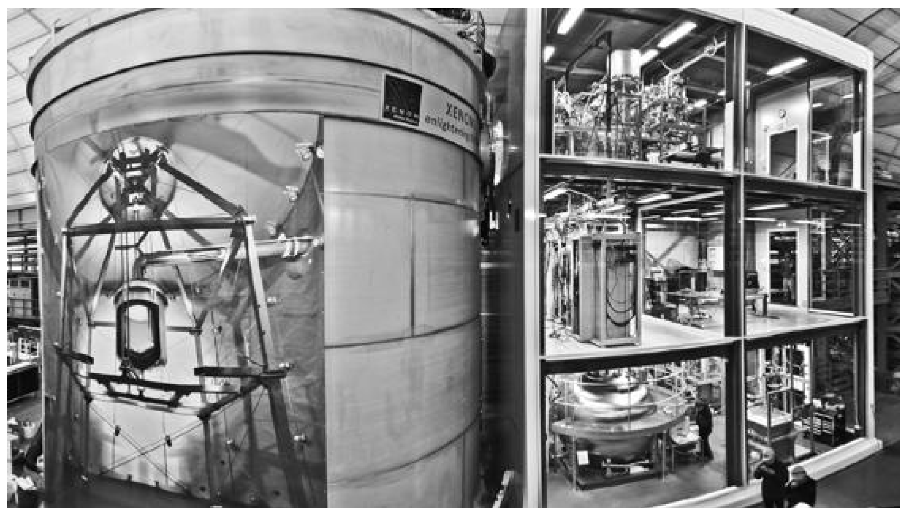
Es más fácil contagiarse de la emoción de los físicos si se conocen algunos detalles sobre el funcionamiento de las trampas de materia oscura —o al menos de las instalaciones creadas con ese objetivo—, como XENON1T.

Los obstáculos a los que se enfrentan no son pequeños. La señal que tan ansiosamente esperan es muy débil, y llegará —si es que llega — en un ambiente muy ruidoso; será algo así como oír caer una moneda en una discoteca con la música a todo volumen. Y es que con

los átomos de xenón también chocan partículas que nada tienen que ver con la materia oscura, como los rayos cósmicos —radiación de muy alta energía procedente de objetos a millones de años luz de distancia— o la radiactividad ambiental. XENON1T está bajo tierra precisamente para que la superficie terrestre actúe de escudo contra los rayos cósmicos. La radiactividad es más difícil de evitar, porque todo es radiactivo en alguna medida. Los materiales con que se ha construido el detector han sido seleccionados para que su emisión radiactiva sea la más baja posible.

Por si el ruido fuera poca dificultad, los cazadores de materia oscura tienen en contra la propia rareza de las colisiones. La probabilidad de que una partícula de materia oscura choque con un átomo de xenón es muy baja. Estamos inmersos en un baño de materia oscura, sí, pero esa materia no interacciona, no «se habla», con la «nuestra». «De la cantidad de materia oscura presente en el halo de nuestra galaxia podemos inferir la cantidad de materia oscura en nuestro vecindario solar, y cuántas de estas partículas llegan a la Tierra», explica Aprile. «Partiendo del hecho de que todavía no hemos detectado ninguna, podemos asumir que muy pocas de estas partículas chocarán con uno de los núcleos de xenón».

En concreto, los físicos estiman que al año se producen apenas unas pocas colisiones con partículas de materia oscura por cada 100 kilogramos de materia. Por eso aquí, como en los espejos de los telescopios, también se cumple la regla del «cuanto más grande mejor»: cuantos más núcleos de xenón contenga el detector, más probabilidades de éxito.



Estructuras para el experimento XENON1T.

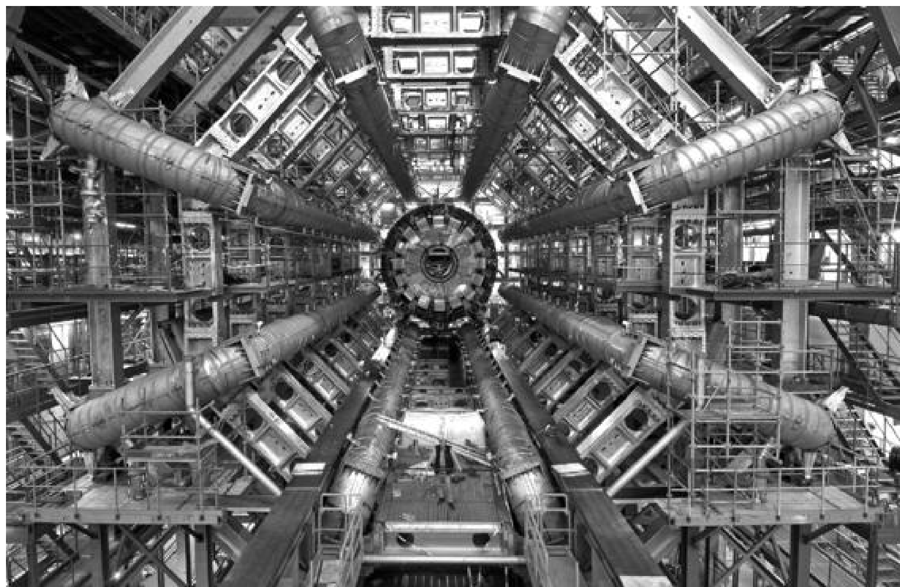
El problema del ruido y la baja frecuencia de eventos esperada pueden ayudar a explicar el fracaso de las búsquedas de materia oscura hasta ahora. Porque XENON1T, desde luego, no es la primera trampa que se tiende. Desde principios del siglo XXI una decena de experimentos han seguido estrategias similares para cazar materia oscura, con diversos grados de sensibilidad. El primer detector de la serie XENON, más pequeño y mucho menos sensible que el actual, se instaló en Gran Sasso en 2006. A lo largo de la pasada década ha habido otros en el propio laboratorio Gran Sasso y también en Japón, Canadá y Estados Unidos.

Durante su estancia en Madrid en 2015, Aprile no ocultó su ferviente deseo de «ser los primeros» en la carrera. «Si la materia oscura está compuesta de WIMP, es muy probable que la detectemos», afirmaba entonces. Pero no detectar nada también sería un resultado valioso, porque permitiría excluir tipos de materia oscura e ir estrechando el círculo. «Tanto si obtenemos una primera señal como si establecemos otro límite de exclusión será esencial mejorar aún más la sensibilidad, y es lo que planeamos hacer después de varios años de operaciones de XENON1T», prosigue esta experta.

A día de hoy, XENON1T no ha dado sorpresas. Pero, efectivamente, ya está previsto el próximo detector de la serie XENON, XENONnT: un tanque que esta vez contendrá ocho toneladas de xenón líquido. Las etapas finales del ensamblaje de este nuevo detector han coincidido con la irrupción de la pandemia de la covid-19, pero en teoría XENONnT debería empezar a operar en 2021.

Si el universo no nos la da, la hacemos nosotros

Hay también otras maneras de «cazar» materia oscura, en el sentido de lograr interaccionar con ella —no solo de detectar su influjo gravitacional en el espacio—. Por ejemplo, los físicos del mayor laboratorio de física de partículas del mundo, el CERN, cerca de Ginebra, han decidido intentar producirla en casa. O, de forma más precisa, en el gran acelerador de partículas LHC, siglas de Gran Acelerador de Hadrones. La coincidencia en el tiempo de las operaciones del LHC y la puesta en marcha de XENON1T ha sido uno de los aspectos que han añadido emoción a la búsqueda actual de materia oscura.



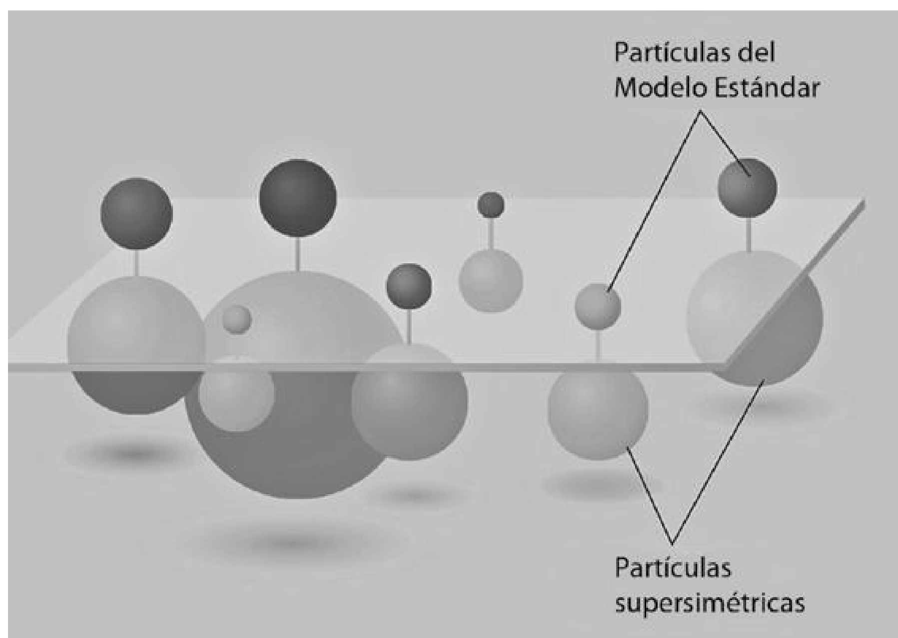
El gigantesco detector ATLAS del LHC.

En el anillo subterráneo del LHC, de 27 kilómetros de largo, los protones son acelerados hasta casi la velocidad de la luz; cuando chocan entre sí, y tal como predice la famosa ecuación de Einstein que relaciona masa y energía ($E = mc^2$, la altísima energía que llevan se transforma en otras partículas, más masivas que las que nos rodean en nuestra realidad cotidiana. En 2010, cuando empezaron a producirse choques de protones en el recién estrenado LHC, la energía que se alcanzaba era de 7 TeV (teraelectronvoltios) —1 TeV es un billón de eV (electronvoltios)—, todo un récord entonces. Entre mayo de 2015 y diciembre de 2018, tras un parón de dos años para las reformas oportunas, el LHC operó a 13 TeV, un nivel de energía nunca alcanzado en ningún acelerador.

Operar a ese rango de energía ha permitido explorar teorías como la de la supersimetría, que prevé la existencia de partículas de un determinado tipo de materia oscura, entre ellas las ya mencionadas WIMP. La supersimetría representa el esfuerzo de los físicos por llenar los huecos que aún persisten en su comprensión sobre de qué está hecha la materia. Hoy en día, el modelo que mejor describe los componentes más fundamentales de la materia es el llamado «modelo estándar» de la física. Este modelo define las partículas elementales —los más pequeños «ladrillos» de materia— y sus relaciones a través de tres fuerzas fundamentales de la naturaleza: las interacciones nucleares fuerte y débil, y la electromagnética. Este modelo ha funcionado muy bien para predecir lo que los experimentos han

mostrado hasta ahora acerca de los bloques de construcción básicos de la materia, pero los físicos reconocen que es incompleto. Por ejemplo, no incorpora la cuarta fuerza fundamental de la naturaleza, la gravitación, ni describe los constituyentes de la materia oscura.

Lo que predice el modelo estándar es que hay dos grandes familias de partículas elementales: fermiones y bosones. Los fermiones comprenden a los quarks, los electrones y los neutrinos, y son las partículas de que se compone la materia. Algunos bosones, como el fotón, los bosones W y Z y el famoso bosón de Higgs, son, en cambio, responsables de las «interacciones» entre esas partículas, es decir, de las fuerzas fundamentales. Todas estas predicciones del modelo estándar han sido bellamente confirmadas en los aceleradores de partículas —la última buena noticia en este terreno fue la detección del bosón de Higgs en el LHC, en 2012—.



Las parejas de partículas y sus partículas supersimétricas.

La teoría de la supersimetría supone un paso adelante, adentrarse de nuevo en lo desconocido. Esta predice que cada partícula elemental tiene una partícula «supersimétrica» asociada: para cada fermión debería haber un bosón, y viceversa. Aún no se ha observado ninguna de estas partículas supersimétricas, y es lo que persigue el LHC.

Sin embargo, y pese a haber operado a un nivel de energía récord en un acelerador, el segundo período de operaciones del LHC no ha generado partículas supersimétricas. En 2014 preguntaron en una

rueda de prensa al entonces director saliente del CERN, Rolf-Dieter Heuer, cuál era la siguiente pregunta más importante que el LHC aspiraba a responder, toda vez que el Higgs ya había sido cazado. Heuer no tuvo dudas: «¿Encontraremos evidencias a favor de la supersimetría, una posible [nueva partícula] candidata para materia oscura o se guardará el universo sus secretos un poco más?».

Ahora que sabemos que el universo opta por mantenernos en vilo hay que esperar a las mejoras en el acelerador, donde las partículas empezarán a colisionar de nuevo en mayo de 2021 y hasta 2024.

Lo interesante es que, en muchas de las formulaciones de la supersimetría, los científicos predicen que las partículas supersimétricas más ligeras son estables, eléctricamente neutras e interactúan débilmente con las partículas del modelo estándar. Y estas son, en efecto, las características requeridas para las propiedades de la materia oscura. Los mejores candidatos hasta la fecha son los llamados neutralinos, unos fermiones supersimétricos de los bosones W, Z y de Higgs, cuyas masas teóricas están justo en los límites de la capacidad actual de detección del LHC. Los neutralinos pertenecen a la categoría más general de las WIMP.

De este modo, la supersimetría es un marco basado en los sólidos cimientos del modelo estándar para crear una imagen más completa del mundo. Quizás sea la respuesta al «incómodo» problema que representa la materia oscura, que no hace más que recordarnos que, hasta ahora, solo hemos tenido en cuenta una parte del universo. Tal vez sea esa la razón por la que todavía tenemos muchas preguntas sobre su funcionamiento.

Una ducha de energía

En el Observatorio del Roque de los Muchachos, a 2400 metros de altitud en las cumbres de la isla canaria de La Palma, hay vistas espectaculares las veinticuatro horas del día. Las vistas nocturnas son inimaginables, en especial si se ha crecido en una ciudad. En las diurnas, las cúpulas de los telescopios se recortan contra el cielo azul intenso. Pero no todos los telescopios del Roque están cubiertos por una cúpula. Dos de ellos, gemelos, tienen su enorme espejo de 17 metros de diámetro expuesto al aire y, vistos de perfil, recuerdan dos gigantes cestas ladeadas en el suelo. Son los MAGIC. Uno de los principales objetivos de esta pareja de peculiares telescopios es detectar el posible rastro de las partículas de materia oscura.

La descripción teórica de las WIMP permite un amplio rango de masas para estas hipotéticas partículas —en concreto, pueden tener una masa entre 0,01 y 10 TeV—, y mientras que XENON1T y el LHC

han buscado WIMP en el rango de masa más baja, los telescopios del tipo al que pertenece MAGIC tienen las de ganar en escalas de energía —y, por tanto, de masa— por encima de 1 TeV aproximadamente.

Todo el mundo sabe lo que es un telescopio: un aparato para ver objetos muy lejanos, en el cielo. Correcto. Pero el término «ver» es muy subjetivo. Los humanos solo vemos con nuestros ojos luz que tiene una energía determinada. La radiación infrarroja y las ondas de radio son igualmente luz porque también son ondas electromagnéticas transportadas por fotones, y en cambio no las vemos. Una parte de la luz que nuestros ojos no captan es menos energética que la visible, como la luz infrarroja y las ondas de radio, pero también hay otra mucho más energética que la que nosotros vemos, como la ultravioleta, los rayos X o los rayos gamma. El mensaje importante es que ahí fuera hay mucha más radiación electromagnética de la que ven nuestros ojos; a los humanos la evolución nos ha «tuneado» con sensores que captan luz de solo una determinada energía —en el rango óptico o también llamado, con gran acierto, visible—, porque ese es el tipo de luz que el Sol produce en mayor cantidad y a la que la atmósfera es transparente.

La buena noticia es que hemos aprendido a compensar nuestras carencias. Los telescopios que detectan luz visible tienen siglos de historia; aquellos con detectores sensibles a luz de menos y de más energía, en cambio, son mucho más recientes, pero también existen. Por supuesto, cada tipo de telescopio revela una cara diferente del universo, versiones del cosmos que hasta hace poco habían permanecido ocultas, pobladas con objetos y fenómenos muy distintos. Las regiones de formación estelar, el polvo en el espacio entre las estrellas… en general, los objetos fríos se estudian mejor en el infrarrojo, mientras que los fenómenos más violentos, como las explosiones de supernovas o la materia que está siendo devorada por un agujero negro, brillan sobre todo en rayos X o gamma.

Los telescopios que podrían —si la teoría es correcta— cazar partículas de materia oscura son los que detectan luz de alta energía, porque algunas candidatas a integrar la materia oscura sufren espontáneamente procesos que emiten rayos gamma. Por ejemplo, varias partículas de materia oscura podrían desintegrarse o aniquilarse entre sí y emitir rayos gamma que llegaran a la Tierra.

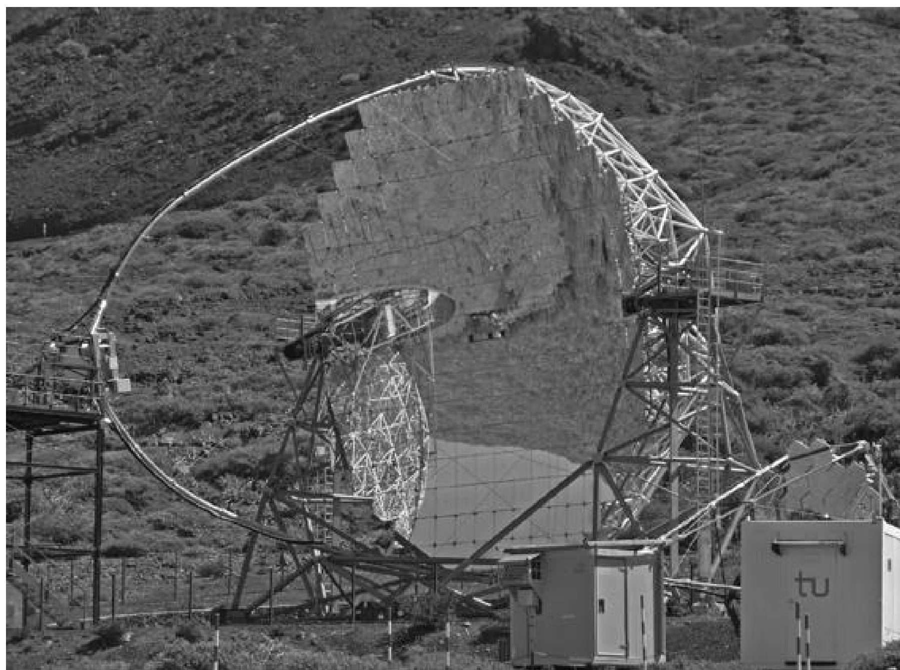
Eso es exactamente lo que querría detectar Javier Rico, del Instituto de Física de Altas Energías (IFAE), en Barcelona, uno de los investigadores que usa MAGIC para cazar materia oscura. En nuestra conversación, Rico expone un argumento de peso a la hora de explicar la importancia de estos telescopios: «Las partículas que vean estos

telescopios proceden del universo, de la materia oscura que afecta al movimiento de las estrellas en la Vía Láctea, o al de galaxias en cúmulos; no están siendo generadas en un acelerador».

Los MAGIC son el resultado de la colaboración entre una decena de países encabezados por Alemania, España e Italia, y trabajan con ellos unos 150 científicos. Empezaron a funcionar a mediados de la pasada década. Sus grandes espejos son ligerísimos, lo que permite apuntarlos a cualquier parte del cielo en menos de 30 segundos. Su manera de detectar rayos gamma es indirecta. Lo que focalizan sus espejos es la consecuencia del choque de un rayo gamma con las partículas de las capas superiores de la atmósfera, y que es, literalmente, una ducha de partículas secundarias. Esas partículas viajan a una velocidad mayor que la de la luz en el aire, y eso las lleva a producir un *flash* ultrarrápido y muy tenue de un tipo de luz azul y ultravioleta llamada radiación Cherenkov —por el descubridor del fenómeno, el físico ruso Pável A. Cherenkov, Premio Nobel de Física en 1958—. Lo que ve MAGIC es esta luz.

Las características de las imágenes que la radiación Cherenkov produce en las cámaras de MAGIC permiten a los astrofísicos averiguar el origen y la energía de la partícula gamma original. Los MAGIC y otros telescopios de su clase, como HESS, en Namibia, y VERITAS, en Arizona (Estados Unidos), han descubierto en la última década un centenar de fuentes de rayos gamma. Son objetos muy difíciles de estudiar —en ocasiones, «imposibles» de estudiar— con los telescopios clásicos: restos de explosiones de supernovas; sistemas binarios en los que una estrella muy masiva orbita en torno a una estrella de neutrones o a un agujero negro; o púlsares, que son los cuerpos que quedan tras el colapso de una estrella masiva, extremadamente densos y que pueden dar vueltas miles de veces por segundo.

Nada hay aún, sin embargo, en lo referido a la materia oscura. Las campañas de observación realizadas hasta ahora con los MAGIC por Rico y sus colaboradores, que además han aunado esfuerzos con el telescopio espacial FermiLAT, de la NASA, también equipado con detectores de rayos gamma, no han encontrado nada.



Uno de los telescopios MAGIC en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla canaria de La Palma.

Los MAGIC han observado durante 160 horas —muchísimas, para un telescopio de este tipo— uno de los objetos donde presumiblemente más materia oscura hay: Segue 1, una pequeñísima galaxia satélite de la Vía Láctea formada, en apariencia, por apenas un millar de estrellas, que desde poco después de su descubrimiento en 2010 encabeza el *ranking* de las galaxias más «oscuras». Los astrónomos descubrieron que las estrellas de Segue 1 se mueven a velocidades muy distintas en relación con la Vía Láctea, y estimaron que para mantener unida una agrupación de estrellas que se mueven a velocidades tan dispares necesariamente debe de haber una enorme cantidad de materia oscura que haga las veces de «pegamento». Se estima que la masa de Segue 1 es 3400 veces superior a la contenida en las estrellas que se ven.

FermiLAT, por su parte, ha observado durante seis años un conjunto de quince galaxias enanas. En el trabajo donde explican sus resultados, en 2016, Rico y sus colegas explican que el trabajo conjunto de los MAGIC y FermiLAT es la búsqueda más profunda jamás realizada con esta estrategia de detección de materia oscura. Pero concluyen: «No hay indicios de materia oscura en nuestros datos».

Suena dramático, pero en realidad no es grave. Es más, en cierto

modo es lo esperado. Los físicos ya saben que los telescopios de radiación Cherenkov de la generación de MAGIC tienen pocas probabilidades de cantar victoria en la detección indirecta de materia oscura. En cambio, sí ponen todas sus esperanzas en la generación siguiente, una instalación realmente grande llamada CTA (*Cherenkov Telescope Array*) de la que una parte estará, también, en el Roque de los Muchachos. Son dos redes de telescopios, una en el hemisferio sur y otra en el norte, que de esta forma podrán observar todo el cielo.

Los telescopios del sur estarán en Chile y cubrirán un área de unos 10 kilómetros cuadrados; la red de La Palma estará compuesta por unos veinte telescopios y abarcará un kilómetro cuadrado. El primero de ellos, el LST-1, fue instalado en 2018 y en 2020 ha hecho públicas sus primeras observaciones. Que la red, una vez montada, cubra un área tan extensa permitirá cazar muchos más rayos gamma y estudiarlos con más detalle que hasta ahora, justo lo necesario para diferenciarlos de los procedentes de la aniquilación de partículas de materia oscura.

Uno de los objetivos de la futura red CTA será observar con todo detalle el centro de nuestra propia galaxia, presumiblemente un foco de acumulación de materia oscura. Los telescopios actuales ya han detectado rayos gamma de alta energía procedentes de esa región, pero el centro galáctico es un área tan concurrida —poblada por multitud de fuentes que emiten en alta energía— que hacen falta instrumentos con mucha mayor resolución para poder discernir qué está ocurriendo realmente. Todos esperan a CTA, que se yergue como uno de los grandes proyectos de la ciencia para las próximas décadas.

«Hasta ahora, entre MAGIC y el resto de los telescopios de luz Cherenkov en Namibia y Estados Unidos sí ha habido competencia; con el CTA la competición será interna, es un proyecto auténticamente global, todos estamos dentro», comenta Rico. «Veremos señales mucho más tenues, podremos detectar acumulaciones de materia oscura mucho menos densas. Y si en los aceleradores de partículas o en los experimentos subterráneos detectan posibles partículas de materia oscura, nosotros las identificaremos ahí fuera, en el universo».

La materia está ahí fuera

El despacho del cosmólogo Juan García-Bellido Capdevila, en el Instituto de Física Teórica (IFT), en Madrid, parece ante todo un sitio silencioso y tranquilo. Una cajita a la que se accede por un pasillo, también silencioso y tranquilo, lleno de puertas iguales. El visitante se pregunta si cada una de las puertas conduce a compartimentos como el que ocupa García-Bellido Capdevila, con vistas a la sierra de

Madrid, silenciosos y tranquilos. Por supuesto, la respuesta es no. Incluso si los despachos son arquitectónicamente iguales no hay duda de que cada uno contiene un universo distinto, adecuado a la línea de trabajo del correspondiente investigador o investigadora: neutrinos, inflación cósmica, multiverso, supersimetría, supercuerdas, energía del vacío… Las paredes son aquí, sobre todo, una ilusión óptica.

El despacho de García-Bellido Capdevila contiene —metafórica y quizá también literalmente—, sobre todo, energía oscura. Y si la «materia» oscura era incómoda, la «energía» oscura no hay quien se la ponga; la energía oscura es… es… un gran misterio. Por un lado, es el ingrediente más abundante del universo, más aún que la materia oscura (véase el recuadro «Cuando lo oscuro es la energía»). Por otro, no se sabe lo que es.

Cuando lo oscuro es la energía

Uno de los hechos fundamentales de la teoría del *big bang* es que el universo se está expandiendo. Y hasta finales de los años noventa se asumía que la expansión estaría siendo frenada, en mayor o menor medida, por la gravedad de la materia que contiene el universo. Sin embargo, en 1998, observaciones de supernovas muy lejanas mostraron que estaba ocurriendo todo lo contrario: el universo se expande hoy más rápidamente de lo que lo hacía en el pasado.

Los cosmólogos elaboraron tres hipótesis para explicarlo. Una, tal vez esta aceleración es consecuencia de una antigua versión descartada de la teoría de la gravedad de Einstein, que contenía lo que se llama la «constante cosmológica». Dos, tal vez existe algún extraño tipo de energía que llena el espacio provocando esta aceleración. Y tres, tal vez hay algo erróneo en la teoría de la gravedad de Einstein y es necesario incluir algún tipo de campo que crea esta aceleración cósmica. En cualquiera de los casos, los teóricos han dado a la solución un nombre: energía oscura.

¿Qué es la energía oscura? Lo único que sabemos es cuánta energía oscura existe, porque sabemos cómo afecta a la expansión del universo. Todo lo demás es un completo misterio. Casi el 70 % del universo es energía oscura. El 30 % restante es materia, de la que la mayor parte —un 85 %, como se ha dicho— es oscura. El resultado de todo este cómputo es que toda la materia «normal» del cosmos, la materia que conocemos, supone menos del 5 % de los ingredientes del universo.

La primera pregunta es obligada: ¿en qué se diferencian exactamente energía y materia oscuras? «La teoría de la relatividad especial dice que materia y energía son lo mismo, $E = mc2$. Pero la materia, si la separas, se diluye —piensa en un gas—, en cambio, la energía oscura no se diluye, y eso es lo peculiar», explica García-Bellido Capdevila. «La razón de este comportamiento distinto es que la

energía oscura no está hecha de cosas corpóreas, materiales… El espacio es dinámico, depende de la cantidad de materia y energía que hay. En el caso de la energía oscura, cada vez estás creando más y más espacio, así que tienes cada vez más y más energía, porque la energía oscura, no se diluye». En otras palabras, cuanto más espacio hay —en un universo que se expande—, más energía oscura hay (véase el recuadro «Cuanto más espacio, más energía oscura»).

Cuanto más espacio, más energía oscura

La energía oscura podría ser una propiedad del espacio. Albert Einstein se dio cuenta de que el espacio vacío no está precisamente vacío: el «vacío» puede poseer su propia energía, una propiedad del espacio en sí. Al contrario que la materia, esta energía del vacío no se diluye a medida que el espacio crece, sino que, cuanto más espacio se crea —en la expansión—, más energía aparece, y más rápido se produce esta expansión. De esta energía del vacío emerge lo que Einstein llamó «constante cosmológica». Nadie entiende aún por qué debería existir esa constante cosmológica, y mucho menos por qué tendría exactamente el valor correcto para causar la aceleración observada del universo.

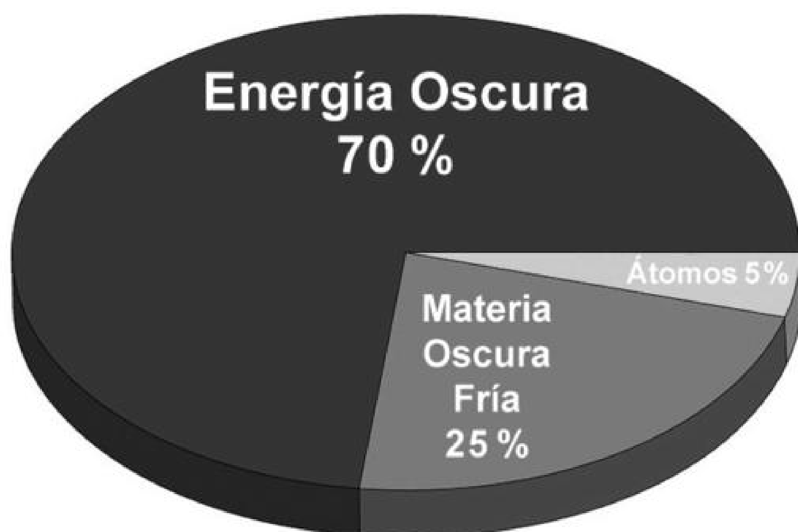
Otra posible solución a cómo el espacio adquiere energía proviene de la teoría cuántica de la materia. Según esta teoría, el espacio vacío está en realidad lleno de partículas que continuamente se forman y luego desaparecen. Pero cuando los físicos trataron de calcular la cantidad de energía que esto daría al espacio vacío, obtuvieron como resultado un número imposiblemente grande. También se puede considerar que la energía oscura es un nuevo tipo de «fluido» de la energía, algo que llena todo el espacio pero cuyo efecto sobre la expansión del universo es opuesto al de la materia y la energía normales. Algunos teóricos lo han llamado «quintaesencia», por el quinto elemento de los filósofos griegos. Pero, si la quintaesencia es la respuesta, todavía no sabemos lo que es, con qué interactúa o por qué existe.

La tercera posibilidad es que la teoría de la gravedad de Einstein no sea correcta. Si eso es así, significa que tampoco entendemos bien cómo se comporta la materia normal en las galaxias y cúmulos de galaxias.

Lo que se necesita para decidir entre estas opciones —una propiedad del espacio, una nueva «dinámica de fluidos» del vacío cuántico, o una nueva teoría de la gravedad— son más y mejores datos observacionales.

García-Bellido Capdevila participa en DES, siglas de *Dark Energy Survey*, un proyecto internacional para investigar cómo ha variado la cantidad de energía oscura a lo largo de la evolución del universo. En DES colaboran más de 300 científicos de 6 países, entre ellos España. Su objetivo, usando una sofisticada cámara creada expresamente y montada en el telescopio Blanco de Cerro Tololo, en Chile, es «tomar instantáneas de mil millones de galaxias lejanas», explica García-

Bellido Capdevila, y determinar con mucha precisión su distancia y a qué ritmo se están alejando de nosotros.



La composición aproximada del universo: el 95 % lo constituyen la energía y la materia oscuras.

Al observar galaxias muy lejanas también se retrocede en el tiempo —si las galaxias están a 7000 millones de años luz, desde la Tierra las vemos tal como eran hace 7000 millones de años—, de forma que midiendo cuánto se alejan galaxias de diferentes épocas es posible reconstruir a qué ritmo se expandía el universo en el pasado.

«Para saber qué es lo que crea espacio entre galaxias tenemos que cartografiar grandes volúmenes de espacio», dice García-Bellido Capdevila. «Con DES vamos a medir miles de millones de galaxias, determinando dónde están en el cielo y también la velocidad a la que se alejan de nosotros. Eso nos dice si en la época en que vemos esas galaxias el universo se estaba expandiendo al mismo ritmo que ahora o a un ritmo diferente. Y eso, a su vez, nos habla de cómo ha cambiado el contenido en energía oscura en el universo. Desde luego puede ocurrir que la variación sea tan débil que no podamos distinguirla. Si eso ocurriera habría que mejorar las medidas: tomar más datos y retroceder más aún en el tiempo».

DES completó a finales de 2019 sus seis años de observaciones, y la gran colaboración internacional sigue analizando datos sobre cientos de millones de galaxias que ayudarán a entender el papel de la energía oscura. Pero hay otro tipo de resultados ya disponibles, relacionados no con la energía, sino con la materia oscura.

En la última década los astrónomos han puesto en marcha ambiciosos programas de observación que, si bien no aclararán la naturaleza de la materia oscura, sí pueden añadir una gran cantidad de información al «mapa» de la materia oscura en el universo observable, averiguando, por ejemplo, cómo se distribuye o si hay más en unos objetos que en otros. Aunque el programa DES se diseñó, sobre todo, para investigar la energía oscura, está siendo además muy útil para entender la materia oscura.

Según explica García-Bellido Capdevila, la cámara de DES debe poder detectar:

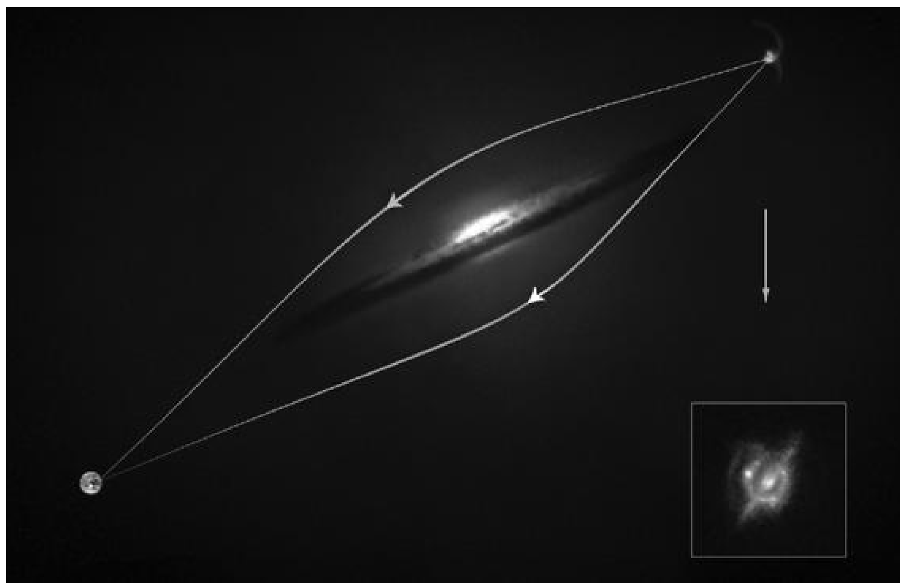
> Objetos muy luminosos, pero también muy débiles, y eso está permitiendo encontrar estructuras que antes no se podían ver, estrellas en regiones donde aparentemente no había nada. Son galaxias enanas, agrupaciones de apenas un millar de estrellas. Hasta ahora solo habíamos visto las galaxias enanas más brillantes: las Nubes de Magallanes, Sagitario… no teníamos sensibilidad para ver las más débiles. Y gracias a la sensibilidad de DES estamos empezando a detectarlas.

Es un tipo de hallazgo importante porque se cree que estas galaxias enanas, como la mencionada Segue 1 observada con MAGIC, son especialmente ricas en materia oscura. Pero, además, la teoría predice que las galaxias grandes se construyen a partir de galaxias pequeñas, por lo que las galaxias que está encontrando DES contribuyen a entender en general la formación de las galaxias. Si hasta el año 2000 se conocían alrededor de una docena de galaxias enanas, en 2020 se han contabilizado unas sesenta pequeñas galaxias satélite que habrían sido capturadas en el pasado por la Vía Láctea, y algunas simulaciones estiman que la cifra puede alcanzar el centenar.

Lupas de gravedad

Otra de las grandes búsquedas astrofísicas de materia oscura es el programa KiDS (*Kilo-Degree Survey*), que desde 2011 observa una vasta región del cielo con los telescopios del Observatorio Europeo Austral (ESO), en Chile. El objetivo es estudiar cómo está distribuida la materia oscura, siguiendo una estrategia basada completamente en la gravedad. KiDS usa lentes gravitacionales, una especie de «gafas» de gravedad cuya existencia fue —cómo no— predicha por Einstein.

Einstein, sin embargo, no creía que fueran detectables. Tampoco imaginó que pudieran llegar a usarse como instrumentos para aclarar un misterio profundo del universo, como la materia oscura.



Esquema del comportamiento de la luz ante la presencia de un objeto muy masivo como una galaxia.

Las lentes gravitacionales existen porque, tal como indica la teoría general de la relatividad, las grandes acumulaciones de materia —oscura o visible— deforman el espacio-tiempo. Una de las consecuencias de este fenómeno es que la luz, al recorrer este espacio-tiempo deformado, también describe una trayectoria curva, y eso se traduce en que su eventual receptor ve una imagen distorsionada. «Distorsionada» quiere decir también ampliada, o incluso duplicada. Las grandes agrupaciones de materia actúan por tanto como verdaderas lentes.

Konrad Kuijken, director científico del Observatorio de Leiden, en Holanda, e investigador principal de KiDS, utiliza una metáfora para explicar cómo la propia gravedad de los objetos en el universo afecta la manera en que los vemos: «Es como mirar a través de una ventana antigua, en la que el vidrio tiene burbujas e irregularidades».

Esto podría ser una mala noticia, porque el vidrio en cuestión no se puede cambiar. «No podemos poner a un lado el propio universo», dice Kuijken. Sin embargo, los astrofísicos han aprendido a sacar partido al fenómeno: estimando cuánta materia integra la lente, y cómo está distribuida, pueden reconstruir la imagen deformada. Y a la inversa: conociendo el grado de deformación de la imagen que observan, pueden hallar cuánta materia hay y dónde está.



Efecto de una lente gravitacional producida por un cúmulo de galaxias: la gravedad de este deforma la luz de una galaxia más lejana en forma de arco.

Es el truco perfecto para encontrar materia oscura. «Dado que la energía y la materia oscuras no parecen interaccionar con la luz ni con las partículas que conocemos, la mejor forma de estudiarlas es medir su gravedad. Y una de las maneras más prometedoras de hacerlo es estudiar cómo se curvan los rayos de luz en los campos gravitacionales, como predijo Einstein», explica Kuijken.

Un detalle curioso es que Einstein predijo la existencia de las lentes gravitacionales ya en 1912, antes incluso de la publicación de su teoría de la relatividad general. Pero, como hemos dicho, no creía posible detectarlas. Observar un objeto ampliado o deformado por una lente gravitacional exige que ese objeto, la materia-lente, y el observador estén alineados, algo que Einstein —según confió a un

amigo en una carta en octubre de 1915— creyó que ocurriría demasiado raramente.

En cualquier caso, la presentación oficial de las lentes gravitacionales en una publicación científica por parte de Einstein no se produjo hasta 1936, en la revista *Science*. Ahí publica lo que él califica de «resultado de un pequeño cálculo» bajo el titular «Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in a Gravitational Field», y explica que lo presenta para dar satisfacción a un ingeniero aficionado checo, Rudi W. Mandl, que le había visitado en Princeton, Estados Unidos —adonde Einstein había emigrado tres años antes—: «Esta nota cumple su deseo», escribe Einstein en las primeras líneas. Y en la conclusión: «… no hay esperanza de observar este fenómeno directamente».

En eso Einstein se equivocaba. En 1979 tres astrónomos, Dennis Walsh, Robert Carswell y Ray Weymann, descubrieron por casualidad la primera lente gravitacional: en sus observaciones aparecían dos cuásares —hoy se sabe que son galaxias lejanas muy brillantes— muy próximos y con características demasiado similares. Su trabajo en *Nature* decía: «Es difícil describirlos como dos objetos diferentes, discutimos [aquí] la posibilidad de que sean dos imágenes del mismo objeto creadas por una lente gravitacional».

Hoy no hay dudas de que el análisis basado en lentes gravitacionales proporciona una instantánea directa de la distribución de la materia oscura, y permite estudiar sus posibles cambios a lo largo del tiempo. En sus primeros resultados, el programa KiDS analizó 2 millones de galaxias a unos 5500 millones de años luz de distancia, y confirmó que las acumulaciones de materia oscura determinan sus características. El mismo patrón se mantiene en los cúmulos de galaxias: las más brillantes se sitúan en el centro, rodeadas por los «grumos» de materia oscura.

Cinco años más tarde, en 2020, KiDS ha publicado un nuevo mapa, esta vez con 31 millones de galaxias situadas hasta a 10 000 millones de años luz de distancia. Lo que muestra no es del todo tranquilizador, porque indica que el universo es más homogéneo de lo predicho por la teoría cosmológica actualmente más aceptada, el modelo estándar, y que hasta ahora han corroborado otras observaciones.

Habrá, una vez más, que mantener a raya la impaciencia y esperar a nuevas observaciones. Ya están en construcción el Observatorio Vera Rubin, un telescopio con espejo primario de 8,4 metros de diámetro que observará desde el norte de Chile, y el satélite de la Agencia Espacial Europea (ESA), Euclid. Ambos instrumentos empezarán a operar hacia 2023, estudiando lentes gravitacionales para investigar la

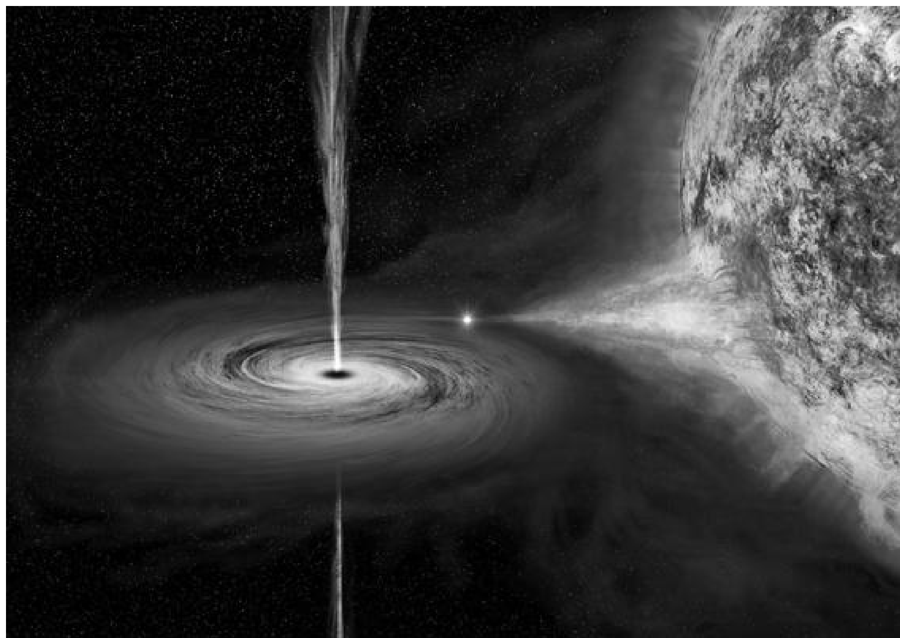
materia y la energía oscuras.

Capítulo 3

Cuando la gravedad agujerea el espacio-tiempo

Tienen mucha razón los que dicen que los astros influyen en la vida de las personas. La del joven astrofísico Teo Muñoz-Darias, investigador en el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), estuvo vinculada durante meses al sistema binario V404 Cygni, situado a unos 8000 años luz. 8000 años luz es como decir «a la vuelta de la esquina». Como referencia, nosotros estamos en uno de los brazos espirales de la galaxia, la Vía Láctea, que tiene unos 100 000 millones de estrellas; el centro galáctico nos queda a 27 700 años luz; el diámetro de toda la galaxia ronda los 150 000 años luz —aunque ya hemos dicho que las galaxias no se sabe en realidad dónde terminan—. V404 Cygni, por tanto, está relativamente cerca. No es su proximidad, sin embargo, lo que determina su influencia en Muñoz-Darias y en otros miles de investigadores en todo el mundo.

La tarde del 15 de junio de 2015, exactamente a las 18:32 en tiempo universal, el telescopio espacial Swift de la NASA detectó una intensa emisión de rayos X en la constelación del Cisne, donde se encuentra V404 Cygni. Inmediatamente se activó el sistema de alerta creado por la comunidad astrofísica internacional para fenómenos celestes que merecen ser observados cuanto antes mejor y usando todos los instrumentos posibles. Diez minutos después, el detector japonés de rayos X a bordo de la Estación Espacial Internacional, MAXI, registró igualmente la señal. Fue el comienzo de una tormenta de actividad en la comunidad internacional de astrofísica.



Impresión artística de un sistema binario en el que uno de los miembros es un agujero negro absorbiendo material de la estrella compañera.

A la hora en que un batallón de telescopios se afanaba por apuntar hacia V404 Cygni esa tarde de junio, Muñoz-Darias estaba jugando al fútbol con amigos en La Laguna (Tenerife), donde se encuentra la sede administrativa del IAC. Al acabar el partido, casi de noche, vio en el móvil las alertas y los *emails* de sus colaboradores. Rápidamente se unió a la marea mundial de científicos emocionados.

Lo que estaba ocurriendo a 8000 años luz de distancia es algo difícil de imaginar en todo su esplendor. V404 Cygni es un sistema binario compuesto por una estrella y un agujero negro; la potente radiación que puso en alerta a los telescopios procedía del entorno del agujero negro, que succiona materia procedente de su estrella compañera.

Detengámonos un instante para hablar de números —y dar una oportunidad a la imaginación—. En V404 Cygni hay un objeto enormemente compacto: una cantidad de masa equivalente a la de una decena de soles como el nuestro comprimida en un espacio de apenas unos 50 kilómetros de diámetro. Es el agujero negro. A su alrededor, una estrella de la mitad de la masa del Sol da vueltas tan rápido que marea solo de pensarlo: a una velocidad de más de 200 kilómetros por segundo completa una órbita en 6,5 días terrestres. Mientras gira, esta estrella va cediendo parte de sí misma a su compañero, convirtiéndose así en su fuente de alimento; en un futuro

para nosotros lejano, la estrella acabará por transferir toda su envoltura al agujero, y de ella quedará solo su núcleo, un cadáver estelar que los astrofísicos catalogan como «estrella enana blanca», girando a gran velocidad.

Sigamos —tras tomar aire—. En V404 Cygni la gravedad encadena a la estrella y al agujero negro en un baile interminable, un baile que es todo menos tranquilo. Sucede que la materia de la estrella no cae directamente al agujero, sin más, antes se va acumulando en un disco en torno a la oscura boca del sumidero. Cada cierto tiempo, y sin que los astrofísicos entiendan todavía muy bien los detalles del proceso, este disco llamado «de acreción» emite de repente grandes cantidades de energía. Y es una de esas erupciones la que detectaron los telescopios en junio de 2015.



Esquema de los componentes del sistema binario V404 Cygni, una estrella y un agujero negro.

Usando una metáfora poco precisa, es como si cada cierto tiempo el voraz agujero negro «tosiera» y, al hacerlo, lanzara al espacio materia caliente, muy caliente. Cuando un agujero negro como el de V404 Cygni sufre una erupción de este tipo escupe chorros de materia a velocidades próximas a las de la luz y a temperaturas de millones de grados.

Teo Muñoz-Darias usa términos menos metafóricos para explicar todo el proceso: «Las capas externas de la estrella se sienten más atraídas por la gravedad del agujero negro que por la de la propia estrella, así que se empieza a transferir material en torno al agujero negro y se forma un disco de acreción. Cuando el disco es suficientemente denso se producen inestabilidades que precipitan la caída del material acumulado sobre el agujero negro, ydan lugar a las erupciones que hemos observado. En el proceso, parte de la materia se transforma en energía, por un mecanismo que está, de algún modo, íntimamente ligado a la expulsión de parte de esa materia».

Metamorfosis de una estrella en agujero negro

Los agujeros negros estelares se forman cuando una estrella masiva colapsa. ¿Esto qué significa? Todas las estrellas evolucionan. Nacen de la condensación de nubes interestelares de gases y polvo desperdigadas por las galaxias; se desarrollan, creciendo y brillando de manera estable en períodos de tiempo más o menos largos dependiendo de su masa, y, en función precisamente de esta característica, mueren de maneras tranquilas, apagándose poco a poco, o bien en titánicas explosiones, llamadas supernovas, que las hacen desaparecer «casi» por completo.

Si la masa de la estrella es mayor de tres veces la del Sol, el resto de la estrella que queda tras la explosión (ese «casi» que decíamos antes) es un cadáver de apenas unos kilómetros de diámetro que colapsará por efecto de la gravedad. El resultado será lo que se denomina en física una «singularidad», un objeto con un campo de gravedad tan intenso que ni siquiera la luz puede escapar de él —de aquí el nombre de agujero negro—. Cuanto mayor haya sido la masa inicial de la estrella, mayor será la masa del agujero negro resultante.

Hay una segunda manera de crear un agujero negro de masa estelar, y es por la aportación de materia a otra estrella. En un sistema binario donde uno de los miembros es una estrella de neutrones, esta puede absorber materia de la estrella compañera, aumentando así su masa y colapsando para formar un agujero negro.

El fenómeno duró casi tres semanas, y durante ese tiempo decenas de telescopios terrestres y espaciales recogieron luz visible e infrarroja, ondas de radio, rayos X, rayos gamma… Para Erik Kuulkers, el jefe científico del telescopio espacial INTEGRAL, de la Agencia Espacial Europea (ESA), que siguió todo el fenómeno, lo de V404 Cygni ha sido una oportunidad «única en la vida de un astrónomo». Incluso los astrónomos aficionados pudieron seguir la evolución de la erupción con telescopios de apenas 20 centímetros de diámetro, toda una primicia para los amantes de la observación del cielo.

Sin embargo, la frase de Kuulkers es falsa. Porque hay al menos un astrónomo al que V404 Cygni ha cambiado la vida no una vez, sino dos. Se trata de Jorge Casares, a la sazón también investigador del IAC y, de hecho, el primer colega a quien Teo Muñoz-Darias llamó la noche del 15 de junio.

Resulta que no es la primera vez que V404 Cygni se despierta. Lo hizo también hace un cuarto de siglo, en 1989, y entonces, aunque los astrónomos estaban mucho menos equipados que ahora, lo detectaron un satélite japonés de rayos X —Ginga— y otros instrumentos a bordo de la legendaria estación espacial rusa Mir. Jorge Casares tenía entonces 27 años y estaba haciendo la tesis doctoral sobre un sistema

binario con un objeto compacto. La noticia del fenómeno le interesó, así que decidió observarlo con el telescopio William Herschel en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla canaria de La Palma. El William Herschel, de 4,2 metros de diámetro, era entonces uno de los mayores telescopios existentes. Y fueron precisamente las medidas de Casares las que desvelaron que había un agujero negro en V404 Cygni.

De hecho, el agujero negro de V404 Cygni se convirtió en el primero cuya naturaleza quedaba oficialmente confirmada. Hasta entonces solo las ecuaciones predecían —con mucha solidez, eso sí— que tenía que haber en el universo cuerpos compactos con las características de los agujeros negros. Y las observaciones apuntaban ya a varios objetos candidatos, con un alto grado de probabilidad, principalmente Cygnus X-1 (véase el recuadro «El primer candidato») y A0620-00, pero nadie había «cazado» uno del que se supiera con certeza, basándose en las leyes físicas hoy sólidamente probadas, que fuera eso, un agujero negro.

Casares determinó la naturaleza de V404 Cygni de la única manera conocida hasta hace poco para detectar agujeros negros: estudiando el movimiento de su estrella compañera —como se verá en el siguiente capítulo, ahora hay otro revolucionario método que proporciona detecciones incontestables—. Las observaciones indicaban que el cuerpo en cuestión era sin duda muy compacto, y que tenía más de las 5 masas solares consideradas entonces frontera entre un agujero negro y el siguiente objeto bajando en la escala de objetos de mayor a menor densidad del universo, las estrellas de neutrones «exóticas». En concreto, Casares dio una estimación para la masa del objeto compacto de entre 8 y 15,5 masas solares. Todo un hito. El trabajo fue publicado en la prestigiosa revista científica *Nature* en 1992. Se titulaba «Una periodicidad de 6,5 días en la nova recurrente V404 Cygni implica la presencia de un agujero negro», y en el resumen los autores —Casares como primer firmante— escribían: «Creemos que esta es la prueba más convincente de la existencia de un agujero negro».

El joven astrofísico contó entonces al diario *El País*: «Mi primera reacción fue de incredulidad; repasé una y otra vez los datos hasta que me convencí de que todo estaba correcto. Habíamos descubierto un agujero negro».

A principios de los noventa, los astrofísicos rebuscaron en los archivos de observaciones pasadas, y descubrieron que había erupciones registradas de V404 Cygni datadas de 1938 y 1956. Es decir, cada dos o tres décadas el sistema se activa. Por eso, lo que

ocurrió en junio de 2015 fue para Casares «una gran sorpresa» —dice —, pero «a la vez muy esperada: sabíamos que podía ocurrir en cualquier momento, pero no teníamos ni idea de cuándo».

De hecho, Casares mantenía el agujero negro bajo una cierta —laxa— vigilancia. Eso, y la casualidad, hicieron que lo observara precisamente muy poco antes de su último despertar. «Desde la erupción de 1989 llevo siguiendo el objeto esporádicamente para estudiar cómo evoluciona el disco de acreción durante la fase de quietud», explica Casares. Desde 2009 no había podido tomar más datos, pero justo las noches del 13 y el 14 de junio tenía tiempo de observación con el WHT para otro programa, y aprovechó para observar también V404 Cygni. Así pues, Casares y sus colaboradores tienen datos de cómo estaba el agujero negro apenas 13 horas antes del inicio de la erupción. «Ese espectro resulta ser bastante valioso, porque ya muestra indicios de actividad en el disco antes de que la erupción fuese detectada por satélites de rayos X», dice Casares.

Tras la alerta del 15 de junio, Casares y Muñoz-Darias tardaron solo unas horas en organizar la campaña de observación con el Gran Telescopio CANARIAS, el GTC, también situado en el Observatorio del Roque de los Muchachos. El GTC es uno de los grandes ojos del planeta. En los telescopios rige la norma «cuanto más grande mejor», porque cuanto mayor es el espejo de estos, más fotones puede recolectar; el espejo del GTC tiene 10,4 metros de diámetro.

Los investigadores están aún interpretando los datos recogidos. El GTC les ha permitido —entre otras cosas— apreciar en el sistema detalles que cambiaban en pocos segundos, algo muy poco habitual en astronomía, una ciencia acostumbrada a pensar en dimensiones temporales de miles de millones de años. «Los agujeros negros son, sin duda, los objetos más exóticos del universo», dice, devoto, Muñoz-Darias. «Lo de V404 Cygni fue espectacular».



El Gran Telescopio CANARIAS.

Hoy se considera probada la presencia en nuestra galaxia de varias decenas de agujeros negros de tipo estelar, es decir, agujeros cuya masa está entre 5 y 15 masas solares —la línea divisoria con las estrellas de neutrones se ha bajado a las 3 masas solares—. Pero hay muchas otras decenas de candidatos a la espera de ser confirmados. Hay sólidas evidencias, además, de que estos números son «la punta de iceberg», o incluso «la punta de la punta», como dice Muñoz-Darias. En particular, el observatorio espacial de rayos X Chandra, de la NASA, podría haber hallado miles de agujeros negros de masa estelar en las proximidades del centro de la galaxia.

En realidad, tiene que haber muchos más agujeros negros de masa estelar: nada menos que entre 100 y 1000 millones solo en nuestra galaxia. De ellos, los que forman sistemas binarios son apenas un millar. Mapear el resto, los agujeros negros «solitarios», es muy complejo, porque estos objetos en sí mismos no emiten luz alguna: una vez que algo cruza su llamado «horizonte de sucesos», su «borde» gravitacional, nada puede escapar de él, ni siquiera la luz. Lo que brilla es la materia que forma el disco de acreción en torno al agujero, que está siendo calentada a temperaturas altísimas y de la que una parte ni siquiera cae al agujero, sino que vuelve al espacio en forma de chorros y vientos muy energéticos.

La traicionera intuición

Los expertos están de acuerdo en que el avance de esta área de investigación en las últimas décadas ha sido revolucionario. El estudio de los agujeros negros ha revelado que, lejos de ser fenómenos exóticos, rarezas cósmicas, estos objetos son numerosos y muy diversos, y juegan un papel esencial en la construcción de las galaxias. Conocer mejor los agujeros negros está provocando un cambio de paradigma respecto a cómo imaginamos el universo en su conjunto.

Su descripción teórica, matemática, es un logro del físico alemán Karl Schwarzschild, que la desarrolló apenas meses después de que Einstein publicara su teoría de la relatividad general en noviembre de 1915. Schwarzschild —que murió menos de un año después por una enfermedad contraída en el frente ruso de la Primera Guerra Mundial— aplicó la relatividad general a las estrellas, y descubrió que la gravedad de determinados astros puede llegar a ser tan alta que atrapa incluso la luz que la propia estrella pudiese emitir.

El primer candidato

Cygnus X-1 está a unos 8000 años luz de distancia de la Tierra. Es un sistema binario formado por una estrella supergigante azul de unas 30 masas solares y un objeto compacto de más de 7 masas solares, que gira en torno a la supergigante en menos de seis días. Su potente y variable emisión de rayos X lo hizo rápidamente el primer candidato a agujero negro en los años sesenta del siglo pasado.

Los astrofísicos han logrado descubrir la existencia de agujeros negros no observándolos directamente, sino a través de los efectos gravitacionales que causan en la materia circundante. Las estrellas se encuentran a menudo «en pareja», es decir, formando lo que se denomina sistemas binarios, en los que los dos astros orbitan uno en torno al otro. Cuando en uno de estos sistemas binarios de estrellas una de ellas explota como supernova, colapsando para formar un agujero negro, su potentísimo campo gravitacional puede absorber la materia de la estrella compañera, que cae en forma de un filamento de plasma y crea un anillo de material que gira rápidamente en espiral en torno al agujero, lo que se denomina un «disco de acreción».

A medida que la materia del disco va cayendo hacia el agujero, gana energía cinética y se calienta, ionizándose sus átomos hasta alcanzar varios millones de grados de temperatura y emitiendo entonces una enorme cantidad de energía, predominantemente en forma de rayos X.

Estos rayos X salen expulsados al espacio antes de que la materia sea engullida por la singularidad. Esta intensa emisión de rayos X provenientes de objetos invisibles muy masivos, que forman parte de un sistema binario, es la que ha permitido a los astrónomos inferir la existencia de los agujeros negros.

Fue precisamente Einstein quien presentó ante la comunidad científica el resultado de Schwarzschild. Pero Einstein, como la

inmensa mayoría de los físicos de la época, no creyó que los agujeros negros existieran realmente. Como explica el físico estadounidense Kip Thorne, autor de un aclamado ensayo de divulgación sobre agujeros negros: «Los agujeros negros no sonaban bien, eran demasiado extraños, iban en contra de cómo Einstein y Eddington intuían que debe comportarse el universo». Einstein y la mayoría de sus colegas tenían «un bloqueo mental impenetrable contra la verdad».

Lo que a los físicos de la época les costaba aceptar como posible es la victoria absoluta de la fuerza de la gravedad sobre todo lo demás a la hora de presionar a la materia hacia su propio centro. En palabras de Thorne: «La gravedad obligatoriamente supera todas las demás fuerzas en el interior del objeto, y lo comprime en una implosión catastrófica que forma un agujero negro». Es decir, la gravedad no solo deforma el espacio-tiempo, sino que además es capaz de agujerearlo —al menos en apariencia, dado que nadie sabe de verdad lo que pasa dentro de un agujero negro—.

El bloqueo de los grandes físicos y astrónomos del siglo XX se mantuvo durante décadas. Solo a partir de los años sesenta empezaron a acumularse evidencias a favor de que los agujeros negros son objetos reales, y comenzó su búsqueda observacional. El hallazgo a mediados de los sesenta del primer candidato a agujero negro con un grado ya muy alto de certeza, Cygnus X-1, situado en la esfera celeste también en la constelación del Cisne, igual que V404 Cygni, y, posteriormente, observaciones como las de Jorge Casares de este último objeto, han ido revelando que el cosmos ofrece una variedad de fenómenos mucho más amplia de la que la mente humana puede siquiera imaginar.

En los años sesenta, cuando empezaron a lanzarse al espacio los primeros detectores de rayos X —un tipo de radiación electromagnética que no llega a la superficie terrestre gracias a la atmósfera—, las primeras fuentes que se detectaron eran miles de veces más energéticas de lo esperado. Los astrónomos habían supuesto que el cielo en rayos X se revelaría muy parecido al que se ve con luz visible, un espectáculo donde los objetos más brillantes son los más próximos, como la Luna. Sin embargo, en realidad mostraba fuentes enormemente brillantes y desde luego mucho más lejanas que nuestro satélite. Eran objetos como Cygnus X-1, donde hoy sabemos que tienen lugar procesos de una violencia difícil de visualizar desde un rincón del cosmos tan tranquilo —en el presente— como el nuestro.

La astronomía de rayos X logró así abrir los ojos de los astrónomos a la realidad de los agujeros negros. Hoy, como se ha visto, estos objetos se estudian con telescopios preparados para cazar y analizar luz no solo de rayos X, sino también infrarroja, radio, etcétera. Eso

permite analizar diferentes procesos físicos y completar el rompecabezas. Pero sigue habiendo un sinfín de interrogantes acerca de los agujeros negros: desde qué mecanismos intervienen para que, de repente, sufran erupciones como la de V404 Cygni, hasta cuál es exactamente su límite inferior de masa: aún hay cierto debate sobre cuándo un objeto compacto es una estrella de neutrones y cuándo un agujero negro.

Desde luego, también se ha aprendido mucho. Está fuera de duda que los agujeros negros son los objetos que producen la deformación más extrema del espacio-tiempo de la época presente del universo. Y también se sabe que tienen un papel mucho más importante de lo que se creía en la «arquitectura» de las galaxias, e incluso de todo el universo. Los agujeros negros son mucho más que exotismos en el zoo de cuerpos celestes que ofrece el cosmos.

Atrévete a imaginarlo

Si resulta difícil imaginar el escenario de la erupción de V404 Cygni, quizás no valga la pena intentarlo con lo que ocurre en el centro de la Vía Láctea, y —con toda probabilidad— en el centro de todas las galaxias. Uno de los grandes hallazgos de la astronomía de las últimas décadas es que, en el corazón de las galaxias, en su núcleo, hay agujeros negros supergigantes: millones de masas solares comprimidas en un espacio con un diámetro como el de nuestro sistema solar. Si la existencia de los agujeros negros de hasta varias decenas de masas solares fue predicha por la teoría, no ocurrió así con los superagujeros galácticos. Esos grandes monstruos se descubrieron por casualidad.

Recurramos de nuevo a Thorne: si a principios de los años sesenta, cuando los físicos teóricos apenas empezaban a aceptar el concepto de los agujeros negros, «alguien hubiera dicho que el universo contiene agujeros negros millones o miles de millones de veces más masivos que el Sol, los astrónomos se hubieran echado a reír», dice. «Cualquier físico teórico que hubiera predicho la existencia de estos agujeros negros gigantes hubiera arruinado su reputación. El descubrimiento de estos agujeros fue casualidad en su forma más pura». Ningún proceso por entonces conocido por los científicos podía dar lugar a «seres» tan… apabullantes.

Los mayores (¿y menores?) miembros de la familia «agujero negro».

La física que se conoce hoy es compatible con al menos tres tipos de agujeros negros: los agujeros negros estelares, los supermasivos y los «en

miniatura». Los agujeros negros supermasivos tienen una masa equivalente a miles de millones de soles y viven en el centro de las galaxias. No sabemos exactamente cómo se forman, pero lo más probable es que sean un subproducto de la propia formación de la galaxia. Se piensa que los agujeros negros estelares que se formaron en los primeros tiempos del universo eran mucho más masivos que los actuales, llegando a tener miles de veces la masa del Sol, y que fueron estos los embriones de los actuales agujeros negros supermasivos en los núcleos de las galaxias. Debido a su ubicación en el centro de las galaxias, cerca de muchas estrellas muy juntas y nubes de gas, los agujeros negros supermasivos continúan creciendo por el aporte constante de materia.

En cuanto a los agujeros negros en miniatura, nadie ha descubierto ninguno todavía. De existir, tendrían una masa mucho más pequeña que la de nuestra estrella. Es posible que estos agujeros negros, también llamados primordiales, se formaran poco después del *big bang*, que se cree dio comienzo al cosmos hace 13 800 millones de años. Muy temprano en la vida del universo, la rápida expansión de algunas porciones de materia podría haber comprimido otras fracciones de materia, que se movían más despacio, lo suficiente como para que estas se contrajeran y formaran agujeros negros diminutos.

Pero lo cierto es que ya desde los años treinta un ingeniero estadounidense llamado Karl Jansky había descubierto inadvertidamente un agujero negro galáctico. Jansky trabajaba para la compañía de teléfonos Bell y le habían encargado investigar el ruido que afectaba a las llamadas intercontinentales. Por entonces las conexiones telefónicas transatlánticas se hacían por radio, así que Jansky construyó una antena para captar fuentes de ondas de radio, y descubrió una del todo inesperada, por cuanto tenía un origen muy lejano: las regiones centrales de nuestra galaxia. Por entonces nadie había explorado todavía el cielo en este rango de frecuencias. Ningún astrónomo hubiera esperado que las fuentes de radio muy lejanas brillaran más que las próximas, porque ¿qué proceso astrofísico podría ser tan energético como para emitir tanto?

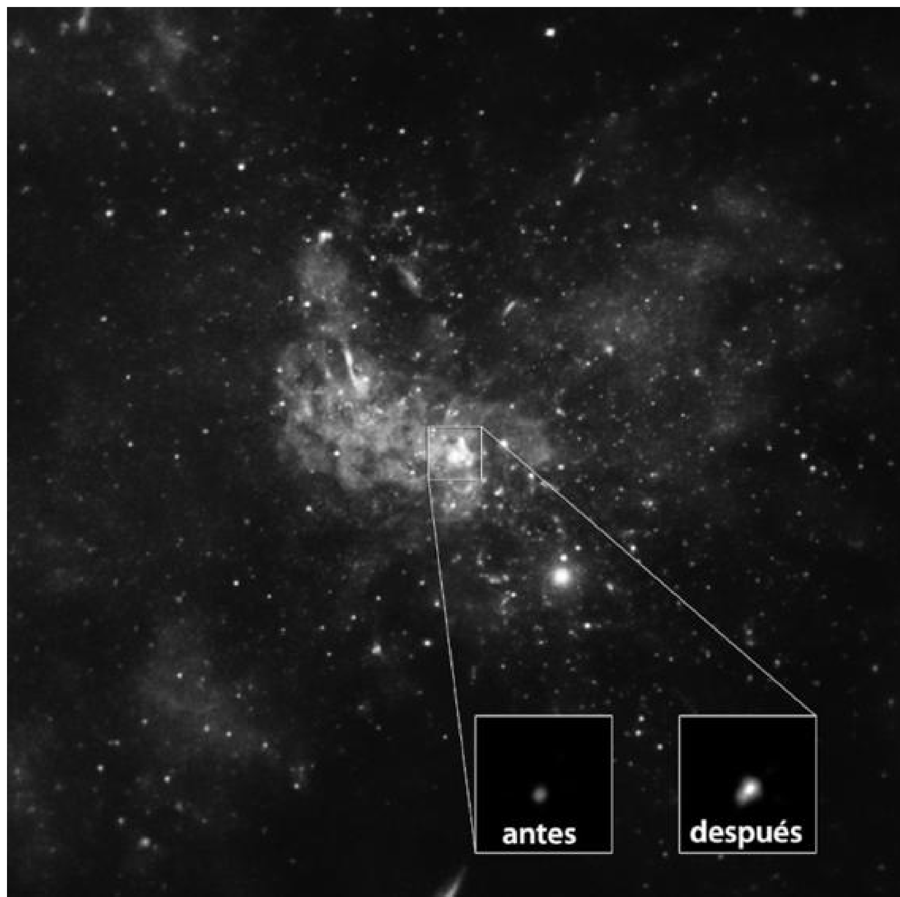
Hubieron de pasar muchas décadas hasta que los radiotelescopios, en los años sesenta y setenta, acabaran desvelando la existencia de agujeros negros supergigantes. Algunos de estos monstruos escupen al espacio chorros de materia caliente —presumiblemente un fenómeno similar a la erupción de V404 Cygni, aunque a escalas muy superiores —, que brillan mucho en radio. Aunque, como ocurrió con los agujeros negros de masa estelar, los agujeros negros gigantes se han observado con posterioridad —y se siguen observando— con telescopios sensibles también a luz de otras longitudes de onda.

Durante un período se creyó que solo las galaxias llamadas «activas» —galaxias enormemente brillantes— albergaban agujeros

negros masivos en su centro. Sin embargo, hoy está claro que todas las galaxias giran en torno a grandes sumideros cósmicos, y que el hecho de que unas brillen más que otras tiene que ver sobre todo con el «régimen alimenticio» del agujero: si está o no devorando materia en la época en que está siendo observado y a qué ritmo. Es decir, los agujeros negros no siempre tienen a su alrededor discos de materia de los que nutrirse.

El agujero negro en el centro de nuestra galaxia, por ejemplo, parece estar ahora bastante tranquilo. Los astrónomos lo llaman Sagitario A* (Sgr A*) —se pronuncia «Sagitario A estrella»— y estiman que tiene una masa equivalente a unos 4 millones de soles. Los telescopios espaciales Chandra, XMM-Newton y Swift concluyeron la pasada década una de las campañas de observación más profunda y continuada sobre Sagitario A*. Cuatro años de toma de datos continuada permitieron detectar un pico de actividad que algunos interpretaron como una nube de gas y polvo acercándose al agujero, pronta a ser devorada. Pero nada comparado con los copiosos banquetes de materia que, con toda probabilidad, Sagitario A* se regaló en el pasado, hace algunos miles de millones de años.

Una atractiva hipótesis sostiene que todos los agujeros negros supermasivos pasan por etapas de gran actividad, lo que implica que todas las galaxias son, al menos durante una fase de su evolución, enormemente luminosas. Incluso nuestra relativamente tranquila Vía Láctea, en la actualidad un remanso de paz comparada con otras, fue, con toda probabilidad, muy brillante en el pasado.



Sagitario A es el agujero negro central de nuestra galaxia, la Vía Láctea. En esta imagen del telescopio espacial de rayos X Chandra se observa en los recuadros el antes y el después.*

«Las galaxias muy activas no son una clase especial de galaxias, probablemente son una fase por la que pasan todas las galaxias, y seguramente no una vez sino varias», explica el experto en agujeros negros gigantes Xavier Barcons, del Instituto de Física de Cantabria —centro mixto del CSIC y la Universidad de Cantabria— y desde 2017 director general del Observatorio Austral Europeo (ESO). «Esto significa que los agujeros negros supermasivos tienen un papel en la evolución de las galaxias mucho más importante de lo que creíamos».

Para llegar a esta conclusión, los astrónomos han hecho números con la materia y la energía que mueven los agujeros negros. «El balance de energía es muy sencillo», dice Barcons. Y muy impresionante. Los agujeros negros supermasivos albergan solo el uno por mil de la masa de la galaxia, es decir, una parte pequeña, pero la energía que han necesitado para formarse es cien veces superior a la

energía gravitacional que mantiene unida la propia galaxia. Ya solo ese cálculo indica que los agujeros negros centrales, supermasivos, deben tener «una influencia brutal en la vida de las galaxias; son un componente en la evolución del universo que hasta hace poco ignorábamos», explica Barcons.

¿De qué manera influirían los agujeros negros gigantes en la evolución de las galaxias? Esta pieza del rompecabezas se obtiene al investigar cómo crece el propio agujero. Sucede que el ritmo al que un agujero negro puede tragar materia tiene un límite, conocido como límite de Eddington; cuando la cantidad de materia dentro de su alcance gravitacional es superior a ese límite, el agujero «se atraganta» —magnífica metáfora de Barcons—, devuelve a la galaxia materia en forma de vientos y chorros tan potentes que «limpian» el espacio y, de esa forma, acaban alejando materia que de lo contrario también acabaría cayendo en el agujero.

Ese barrido del material interestelar en la galaxia interfiere con el otro proceso esencial en el balance energético de esta: la formación de nuevas estrellas. De esta forma, la evolución del agujero negro central estaría íntimamente ligada a la evolución de la galaxia en su conjunto.

Rotan y son calvos: los agujeros negros

En los años sesenta se produjeron avances importantes en el conocimiento teórico de la física de los agujeros negros. En 1963, el físico neozelandés Roy Kerr descubrió una solución a las ecuaciones de Einstein de la relatividad general que describe un objeto que gira, y sugirió que una estrella que colapsa por la gravedad forma un agujero negro en rotación. Obviamente, este gira porque la estrella a partir de la cual se formó giraba sobre sí misma. Un agujero negro en rotación podría abultarse hacia afuera cerca de su ecuador debido a su rotación —cuanto más rápido es el giro, más se elonga el agujero—.

Por su parte, en 1965, el joven matemático inglés Roger Penrose y el físico estadounidense John Wheeler demostraron que cualquier estrella abocada al colapso gravitacional forma un agujero negro perfectamente esférico, cuyo tamaño depende únicamente de su masa. Aunque parezca un objeto muy extraño, un agujero negro se puede describir por solo tres propiedades: la cantidad de masa que le dio origen, la rapidez con que está girando y su carga eléctrica. A partir de esto, Wheeler afirmó que «los agujeros negros no tienen pelo», con lo que quería decir que cualquier otra información sobre la materia de la que se formó un agujero negro se mantiene siempre inaccesible a los observadores externos.

Brandon Carter, físico teórico australiano, y su colega inglés Stephen Hawking, demostraron matemáticamente que, en efecto, los agujeros negros no tienen pelo a principios de 1970. También propusieron unas leyes de la mecánica de los agujeros negros, análogas a las leyes de la termodinámica, relacionando masa y energía, y la gravedad de la superficie con la

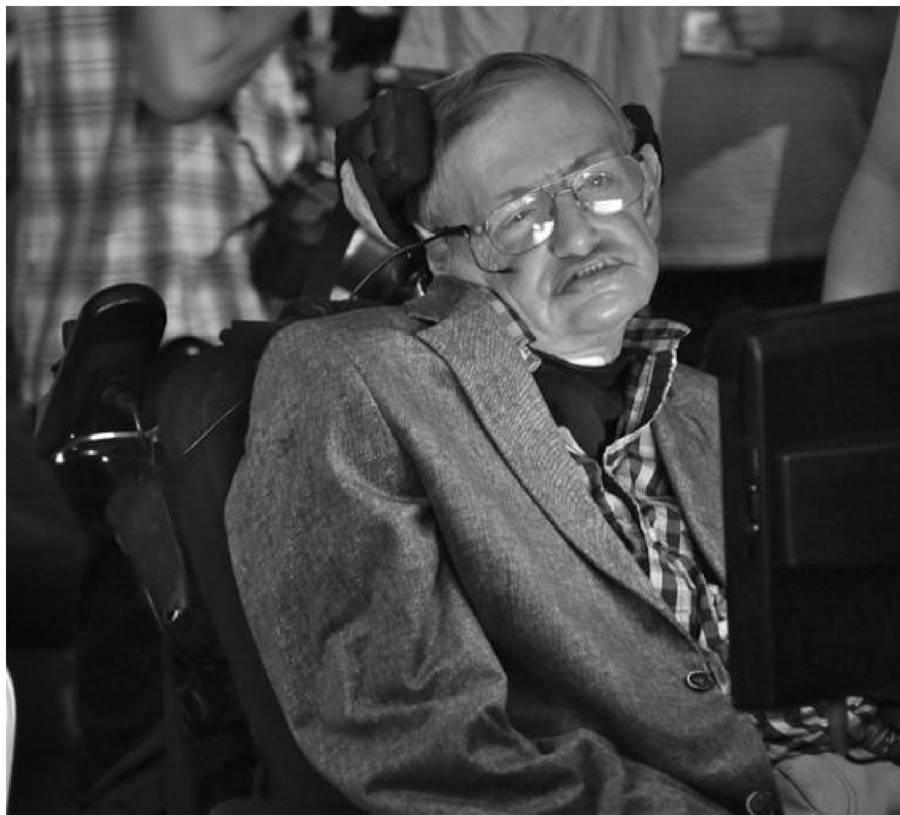
temperatura.

Si se considera el universo a gran escala —si fuera posible ver el universo «desde fuera»—, las galaxias vienen a ser ladrillos que se unen en estructuras de materia aún mayores: cúmulos y supercúmulos. Si los agujeros negros gigantes, las manifestaciones más poderosas del efecto de la gravedad en el espacio-tiempo, cumplen un papel tan importante en la evolución de las galaxias, en cierto modo lo tienen también en la definición de la arquitectura del universo a gran escala.

Para comprobar esta hipótesis es necesario observar agujeros negros gigantes en el universo temprano, y para eso se requieren telescopios más potentes que los actuales. Barcons es uno de los líderes del proyecto Athena, el gran telescopio de rayos X que la Agencia Espacial Europea planea lanzar hacia principios de la década de 2030.

Por supuesto, esto no es lo único que falta por averiguar respecto a los agujeros negros. Quedan muchas otras preguntas pendientes. Por ejemplo: ¿son para siempre? La edad de oro de la física de los agujeros negros, iniciada con el descubrimiento de Roy Kerr a principios de los años sesenta, tuvo uno de sus grandes hitos en el descubrimiento teórico de que sí hay algo que escapa al poder atractor de los agujeros negros. En 1974, el físico teórico británico Stephen Hawking conmocionó al mundo de la física al afirmar que los agujeros negros emiten partículas subatómicas, en lo que se conoce hoy en día como «radiación de Hawking», hasta que agotan su energía y se evaporan por completo. De acuerdo con esta teoría, los agujeros negros no son completamente negros, y tampoco duran para siempre —aunque sí mucho tiempo: un agujero con la masa del Sol tarda en evaporarse debido a la radiación de Hawking un tiempo equivalente a muchas veces la edad actual del universo—.

Hawking mostró cómo el fuerte campo gravitacional alrededor de un agujero negro puede afectar al destino de los correspondientes pares de partículas y antipartículas, como está ocurriendo todo el tiempo en el espacio aparentemente vacío según la teoría cuántica. Si se crean las partículas justo fuera del horizonte de sucesos —la frontera de «no vuelta atrás» del agujero—, entonces es posible que un miembro de la pareja, por ejemplo, un electrón, pueda escapar —observado en forma de radiación térmica emitida desde el agujero negro— mientras el otro puede volver a caer dentro, y de esta manera el agujero negro perdería masa gradualmente.



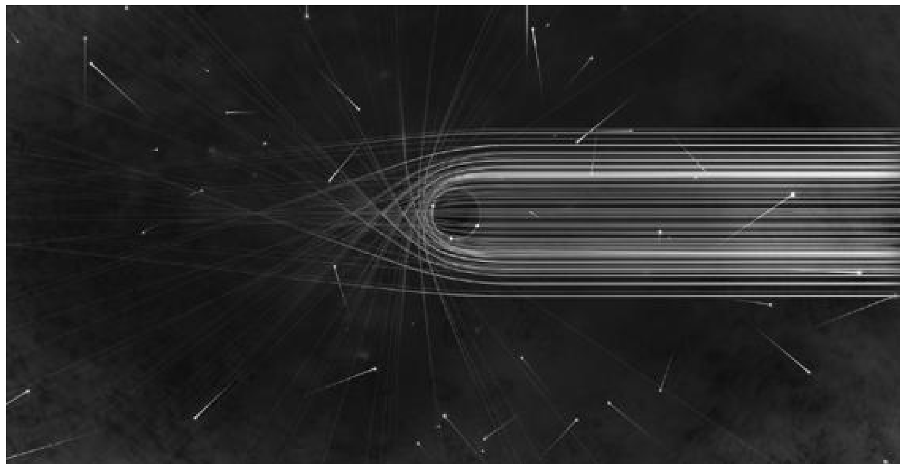
El físico Stephen Hawking en una imagen del año 2005.

Como colofón, se plantea otra gran pregunta: ¿qué ocurre dentro de un agujero negro, más allá del horizonte de sucesos? Según las ecuaciones hoy disponibles, una singularidad tendría densidad infinita y volumen cero, algo imposible y que, por tanto, indica que la física actual aún no puede explicar qué pasa cuando se concentra mucha fuerza de gravedad en muy poco espacio. De lo que no hay duda es de que la singularidad —el agujero negro— absorbe toda la materia y energía que se ponen al alcance de su influencia gravitacional. Un verdadero sumidero en el tejido del espacio-tiempo.

La sombra de la bestia

A pesar de todas nuestras observaciones indirectas de los agujeros negros, cuya existencia se ve revelada por su inconfundible huella gravitacional, aún nos faltaba algo básico para la manera en la que la mente humana construye la realidad: «ver» un agujero negro. ¿Es esto posible? ¿No hemos dicho que la luz no puede escapar del pozo de gravedad de un agujero negro? ¿Podemos ser capaces con nuestros telescopios de tomar una imagen de estas singularidades?

Un equipo multinacional de investigadores trató de dar contestación a estas preguntas. Y la respuesta llegó en una rueda de prensa el 10 de abril de 2019, tras dos años de trabajo con una de las galaxias cercanas más masivas que se conocen: la enorme galaxia elíptica M87.



Impresión artística que muestra las trayectorias de los fotones que se encuentran en las proximidades de un agujero negro. Por efecto de su campo gravitacional algunos caen a su interior, pero otros son capturados en órbitas circulares justo por fuera del horizonte de sucesos. Cuando estos fotones escapan en dirección al observador, generan un círculo luminoso que rodean a un centro oscuro: justo la imagen captada por el Telescopio del Horizonte de Sucesos.

Situada a unos 55 millones de años luz de distancia en la constelación de Virgo, y descubierta por el astrónomo francés Charles Messier a finales del siglo XXVIII, es la mayor integrante del cúmulo de galaxias de Virgo, con mas de 2000 miembros. M87 tiene el doble de masa que nuestra Vía Láctea y diez veces más estrellas. Como ya hemos explicado, al igual que todas las galaxias grandes, en su centro tiene un agujero negro supermasivo, uno de los mayores estudiados, con una masa estimada de unos 6500 millones de veces la del Sol. Su presencia explica también otra de las singularidades de M87: un chorro bipolar de materia que es expulsado desde su centro a velocidades cercanas a la de la luz. Y precisamente ha sido el agujero negro central de esta galaxia gigante el objetivo para las primeras observaciones del EHT.

El *Event Horizon Telescope* (EHT) o «Telescopio de Horizonte de Sucesos», es un conjunto de ocho radiotelescopios terrestres de todo el mundo capaces de funcionar de forma coordinada, entre los que se encuentra la antena de 30 metros de diámetro del Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM) de Pico Veleta, en la Sierra

Nevada granadina. El consorcio que aglutina a estas antenas lo componen más de dos centenares de personas de trece instituciones en veinte naciones distintas. Y el objetivo tras este proyecto es bien simple y tremendamente complejo a la vez: usando la técnica de la interferometría de muy larga base, combinar las observaciones de diferentes radiotelescopios en todo el planeta para formar una única «imagen» de un agujero negro.



IMapa con la ubicación de los ocho conjuntos de radiotelescopios integrantes del EHT que se usaron para obtener la primera imagen de la sombra de un agujero negro, en Hawái, Estados Unidos, México, Chile, el Polo Sur, Groenlandia, España y Francia.

El principio básico de la interferometría nos dice que, si cogemos dos telescopios, separados por una cierta distancia entre sí, la llamada línea de base, y observamos un mismo objeto de forma simultánea, ya que la luz que nos llega de este objeto lo hace en forma de frente de onda, cada uno de los telescopios captará una parte ligeramente distinta de esa onda, con una diferencia temporal extremadamente pequeña. Pero si la tenemos en cuenta y combinamos los datos de

ambos instrumentos, seremos capaces de medir la estructura del objeto observado con un nivel de detalle, una resolución, equivalente a si hubiéramos usado un único telescopio con un diámetro igual al de la separación entre ellos, de ahí la denominación de interferometría de muy larga base. De este modo, empleando radiotelescopios en diferentes emplazamientos, por ejemplo, en Hawái y Europa, podemos tener el equivalente de un radiotelescopio *virtual* de 10 000 kilómetros de diámetro. Así, la resolución del EHT es del orden de 50 microsegundos de arco, o aproximadamente el tamaño aparente de una pelota de tenis en la superficie de la Luna.

Pero ¿qué es lo que se puede ver con esa resolución? Si hablamos de intentar tomar una imagen de un agujero negro, ¿no es, por definición, invisible, pues se traga materia y radiación y no deja escapar nada?

No exactamente. En efecto, el agujero negro en sí no es visible, pero lo que sí podemos ver es la silueta brillante del horizonte de sucesos. A medida que la materia cae hacia el pozo gravitacional del agujero, se calienta emitiendo radiación a todo lo largo del espectro electromagnético, desde los rayos gamma a las microondas. Cuando esta radiación se halla ya muy cerca del horizonte de sucesos, algunos fotones pueden ser desviados por la intensa gravedad del agujero negro, girando a su alrededor y formando lo que se denomina un anillo de fotones. Otros caen hacia dentro para no escapar nunca. La combinación de estos dos efectos crea lo que conocemos como la «sombra» del agujero negro: un círculo negro rodeado por una especie de collar brillante: el anillo de fotones.

Esta sombra tiene un tamaño que es del orden de cinco veces mayor que el horizonte de sucesos del agujero negro, y ya que el anillo de fotones es observable, sobre todo, en longitudes de onda milimétricas, la mejor opción de poder detectarlo es usando un conjunto de radiotelescopios con la resolución suficiente y en la longitud de onda correcta: el EHT es el instrumento ideal.

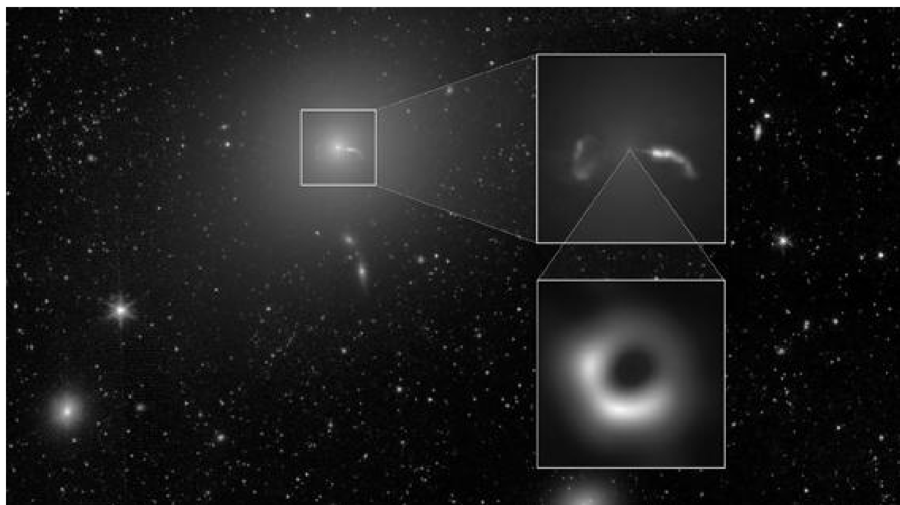
Los estudios realizados por los investigadores del EHT antes de poner en marcha la campaña observacional arrojaron como resultado que solo había dos sombras de agujeros negros supermasivos candidatos a poder ser resueltos por el conjunto de radiotelescopios: Sagitario A*, el agujero negro central del núcleo de nuestra galaxia, la Vía Láctea, y el del núcleo de la galaxia M87, ambos con un tamaño aparente en el cielo de unos 50 microsegundos de arco. Aunque la diferencia en distancia a la Tierra entre ambos —27 000 años luz el de nuestra galaxia frente a 55 millones de años luz el de M87— es gigantesca, igualmente es enorme la diferencia en tamaños de los dos

agujeros negros. El de la Vía Láctea es mil veces menos masivo que el de la galaxia gigante M87, por lo que al final, el tamaño aparente de las sombras de los dos es aproximadamente similar. Sin embargo, mientras que la luminosidad del anillo de fotones de Sagitario A* varía con mucha rapidez, del orden de minutos, la de M87, debido a su mayor tamaño, lo hace en una escala de días. Este último factor facilita mucho más el procesado de los datos observacionales, por lo que, aunque el EHT ha estudiado ambos agujeros negros, el primer resultado obtenido ha sido el de la galaxia de Virgo.

Y no ha sido fácil. Durante años, el consorcio del EHT desarrolló técnicas, algoritmos y simulaciones de cara a prepararse para la campaña observacional. Probaron equipos en los radiotelescopios, desde las cumbres volcánicas de Hawái hasta el mismo polo sur en la Antártida, pasando por el desierto de Atacama chileno. Ensayaron y calcularon, pero también se frustraron, cometieron errores y los solucionaron. Y por fin, a primeros del mes de abril de 2017, los radiotelescopios del EHT orientaron sus antenas a lo largo de cuatro días al agujero negro del núcleo de M87.

Nada menos que 5 petabytes de datos en media tonelada de discos duros volaron a sendos supercomputadores en Estados Unidos y Alemania, donde todo ese tsunami de información hubo de calibrarse, y, especialmente, combinarse con una precisión temporal de una billonésima de segundo. Cuatro equipos diferentes de investigadores del EHT, sin contacto entre ellos, tomaron los datos y usaron diferentes algoritmos para su procesado, con el fin de reconstruir la imagen de la sombra del agujero negro. Y los cuatro obtuvieron resultados maravillosamente similares: cuatro círculos oscuros rodeados por anillos luminosos. Con esos datos preliminares, de nuevo, se hicieron otros tres equipos que procesaron y reconstruyeron los datos con tres métodos distintos, que crearon tres resultados independientes mucho más precisos. Finalmente, esas tres imágenes se combinaron en una única imagen final, fruto del consenso de todos los investigadores, que mostraba con claridad, y por primera vez, la sombra de un agujero negro con el tamaño y la forma predichos por la teoría de la relatividad general.

El 10 de abril de 2019, los representantes del Event Horizon Telescope, mostraron al mundo en una rueda de prensa simultánea en cinco países la deseada imagen. El director fundador del EHT, Sheperd Doeleman, del Centro de Astrofísica Harvard-Smithsoniano, dijo simplemente: «Hemos visto lo que pensábamos que era invisible. Hemos visto y tomado una imagen de un agujero negro. Aquí está».



La galaxia elíptica gigante M 87 posee un núcleo activo del que surge un flujo bipolar. El mecanismo que explica este fenómeno incluye un agujero negro supermasivo, cuyo horizonte de sucesos induce una sombra que se observó mediante ondas de radio con el Event Horizon Telescope (Telescopio del Horizonte de Sucesos).

El resto es historia. La imagen de ese donut amarillo anaranjado rodeando a un centro oscuro dio la vuelta al mundo y fue portada de periódicos, cabecera de telediarios y viral en las redes sociales. No en vano se trataba de la primera imagen de un agujero negro —o de su sombra, tanto da…—. Desde entonces, los científicos siguen trabajando. La imagen confirma de un modo muy preciso las simulaciones que se habían hecho acerca de la apariencia del anillo de fotones, lo que demuestra que las predicciones eran correctas. La comprensión de la física subyacente es el paso siguiente. Y todavía se está trabajando en los datos del agujero negro de Sagitario A*, más difíciles de procesar.

En septiembre de 2020, el equipo del EHT hizo públicos nuevos estudios que mostraban que, asimismo, la apariencia de la sombra del agujero negro de M87 cambia con el tiempo, oscilando y rotando debido, probablemente, a turbulencias en el flujo de materia cayendo hacia el horizonte de sucesos. Y suma y sigue, nuevos radiotelescopios se están incorporando al EHT, y el estudio de la dinámica del agujero negro de M87 continúa y continuará.

De lo que no cabe duda es de que esa sombra negra, esa oscuridad rodeada de un anillo luminoso, nos señala el horizonte de la física, un lugar donde el propio tejido del espacio-tiempo del universo se deshace y se adentra en el territorio de lo desconocido. Y si bien hasta ahora habíamos observado los efectos indirectos de estos leviatanes gravitacionales, esta es la primera vez que podemos atisbar, gracias a

nuestros instrumentos, la sombra de la bestia.

Capítulo 4

Crónica de un descubrimiento anunciado

La primera vez que contacté con Alicia Sintes, investigadora en el Grupo de Relatividad y Gravitación de la Universidad de las Islas Baleares (UIB), no imaginé hasta qué punto iba a ser necesario hablar con ella para construir este libro. Era febrero de 2016. Quería fijar una entrevista, y ella respondió sin titubear: «La semana que viene, imposible. La siguiente… ya sí». Sintes es responsable del grupo español que participa en la colaboración LIGO, el asombroso instrumento que en estos años ha demostrado que, en contra de lo que pensaban Einstein y un buen puñado de científicos contemporáneos, sí es posible detectar cómo tiembla el espacio-tiempo cuando pasa una onda gravitacional. Pero eso aún no había ocurrido el día de esa primera conversación con Sintes. Quería hablar con ella, de hecho, justo para preguntarle qué tal iba LIGO y cómo de fundadas eran las esperanzas de cazar alguna onda gravitacional.

Nada más colgar llegó la convocatoria de prensa. LIGO, que acababa de empezar a funcionar en su versión mejorada, convocaba a cuatro días vista un encuentro con periodistas en la sede de la Fundación Nacional de Ciencias de Estados Unidos, en Washington. Poco más decía el comunicado de prensa. ¿Sería verdad? Hacía meses que en los corrillos científicos circulaba el rumor: LIGO había detectado ondas gravitacionales. Empezaba a ser un *runrún* demasiado insistente; las redes sociales se llenaban de gente emocionada que decía haber visto datos en pantallas de otra gente, e incluso las publicaciones científicas más prestigiosas se habían hecho eco del revuelo entre pasillos.

El 30 de septiembre de 2015 la revista *Nature* publicaba un artículo de Davide Castelvecchi con el título «Has Giant LIGO Experiment Seen Gravitational Waves», («¿Ha visto el gran experimento LIGO ondas gravitacionales?»). Y el subtítulo: «An improbable rumour has started that the observatory has already made a discovery —but even if true, the signal could be a drill», («Corre el rumor improbable de que el observatorio ya ha hecho un descubrimiento, pero incluso si la señal fuera verdadera, podría tratarse de un simulacro»). La noticia explicaba que LIGO ni confirmaba ni negaba el rumor, e incluía la respuesta oficial de su portavoz, Gabriela González, física en la Universidad del Estado de

Luisiana, un lacónico: «estamos analizando los datos». La estela de las revistas científicas de prestigio fue seguida por los medios de información general. El 12 de enero de 2016 *The Guardian* escribía: «El *tweet* de un cosmólogo parece confirmar los rumores del descubrimiento que podría “abrir una nueva ventana al universo”».

Claramente, se detectaba una perturbación de la fuerza en la comunidad de cazadores de ondas gravitacionales. El hecho de que Sintes me enviara la convocatoria de rueda de prensa y admitiera al mismo tiempo que para ella sería del todo imposible ser entrevistada antes de ese acto, ¿indicaba que el rumor estaba a punto de ser confirmado?

En efecto, el 11 de febrero de 2016 el proyecto LIGO, una colaboración de un millar de científicos de muchos países —entre ellos el grupo de Sintes— anunció de manera oficial al mundo que su instrumento había observado por fin un fenómeno largamente esperado: una vibración en el tejido del espacio-tiempo, lo que ha dado en llamarse una onda gravitacional.

Dicho así no parece tanto. Y ciertamente lo que midió LIGO es poco, poquísimo: una diferencia minúscula en la distancia entre dos puntos situados a varios kilómetros. Donde «minúscula» quiere decir algo mucho más pequeño que lo que puede ver el mejor microscopio: una diezmilésima parte del diámetro del protón. Sin embargo, el hecho de que lo medido sea tan diminuto añade valor a la hazaña: puede que no parezca tanto… pero lo es. Sucede que esa minúscula variación de distancia entre los puntos no es un desplazamiento cualquiera. En realidad, los puntos no se han movido en absoluto respecto a nada de lo que está a su alrededor; lo que se ha estirado y contraído ha sido la propia realidad, el sustrato en el que tiene lugar todo lo que percibimos y somos, el mismísimo espacio-tiempo.

En la rueda de prensa del anuncio no había jefes de Estado ni música espectacular ni, en general, gran boato. Pero los científicos presentes, estadounidenses pero también europeos y australianos, en representación de diversas instituciones implicadas en LIGO, apenas podían contener la emoción. «LIGO ha sido un esfuerzo de medio siglo», dijo Kip Thorne, el físico que en 1976 se atrevió, tras muchas dudas, a proponer a su universidad, CalTech, un proyecto enormemente arriesgado, lleno de incertidumbres tecnológicas —y a quien hemos citado ya varias veces en este libro—. La Fundación Nacional de Ciencias estadounidense lo apoyó —ya con la implicación de otras instituciones, como el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)—, a pesar de las dudas de todos.

En la rueda de prensa del anuncio la directora de la NSF, France

Cordova, dijo orgullosa: «Era un proyecto muy arriesgado que hemos financiado durante cuarenta años, pero eso es lo que hacemos los científicos: no hacemos lo fácil». Y sobre la institución que representa: «La Fundación Nacional de la Ciencia es la agencia que asume este tipo de riesgos. Apoyamos la ciencia fundamental y la ingeniería en la etapa de la ruta hacia el descubrimiento en que el camino no está claro en absoluto. Nosotros financiamos a pioneros». Palabras dignas de un emocionante discurso de Hollywood, pero esta vez 100 % auténticas. Cuando el director ejecutivo del laboratorio LIGO, David Reitze, subió al atril y dijo: «Señoras y señores, hemos detectado ondas gravitacionales. ¡Lo hemos conseguido!», la sala estalló en aplausos.

Quedaba confirmada una importante predicción de la relatividad general: los objetos muy masivos en movimiento pueden llegar a provocar sacudidas tan violentas en el espacio-tiempo que la vibración resultante se propaga a la velocidad de la luz y hasta a miles de millones de años luz de distancia. La metáfora que se usa habitualmente es la de una piedra lanzada en un estanque, donde la superficie del agua es la «superficie» del espacio tiempo, en un universo al que, para ayudar a la imaginación humana, se ha eliminado una dimensión. En esa metáfora «hay que pensar en un observador que mira nuestro universo desde fuera», explicó Thorne en la rueda de prensa. Las ondas se propagan por el espacio-tiempo comprimiéndolo y expandiéndolo, de forma que un cuerpo que es atravesado por una onda gravitacional será estirado y comprimido en altura y anchura alternativamente.

Lo que detectó LIGO era una señal ínfima, es cierto. Pero eso es así solo porque las ondas gravitacionales pierden intensidad mientras avanzan, y el suceso que provocó la señal detectada por LIGO se produjo nada menos que a 1300 millones de años luz de distancia. El fenómeno en sí no tiene nada de pequeño. Al contrario, es de los más energéticos que se producen en el cosmos: liberó una energía cincuenta veces superior a la que emiten todas las estrellas del universo observable. Fue la fusión de dos agujeros negros.

Así funciona LIGO

Los detectores a la escala de LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory u «Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferómetro Láser») usan la interferometría láser para medir las minúsculas variaciones en el espacio-tiempo causadas por el paso de ondas gravitacionales.

LIGO consta de dos interferómetros que distan unos 3000 kilómetros

entre sí situados en Estados Unidos: uno en Hanford, Washington y el otro en Livingston, Louisiana, operados de forma conjunta. Ambos funcionaron del año 2002 al 2010 sin lograr ninguna detección, tras lo cual fueron mejorados y convertidos en LIGO Avanzado, que comenzó a funcionar en 2015. El 14 de septiembre de ese año, operando aún en pruebas, LIGO Avanzado detectó ondas gravitacionales. Un hito histórico.

¿Cómo lo consiguió? Cada uno de los interferómetros de LIGO consta de dos brazos de 4 kilómetros de longitud posicionados en ángulo recto respecto de un edificio central. Desde este se envía un haz de láser que se divide en dos rayos, cada uno a lo largo de un brazo, donde rebotan en un espejo al final de su brazo respectivo y son devueltos al origen para ser combinados de nuevo en un solo haz, creando lo que se denomina un patrón de interferencia.

Cuando pasa una onda gravitacional, esta «deforma» el espacio alargando y acortando los brazos. Como el patrón de interferencia depende del camino total recorrido por cada uno de los haces, midiendo los cambios en este patrón podemos deducir que la longitud de los brazos ha variado, tal y como predice la relatividad general. LIGO es sensible a variaciones en longitud hasta 10 000 veces menores que el tamaño de un protón (esto es, ¡0,0000000000000000001 metros!).

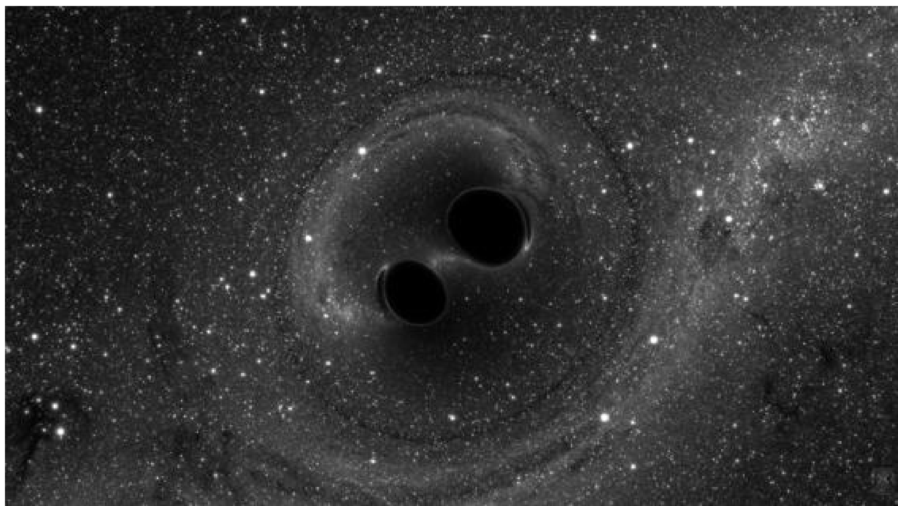
Y, al observar el mismo cambio en los dos interferómetros, Hanford y Livingston, se comprueba que efectivamente se trata del mismo fenómeno. La única salvedad es la de la diferencia temporal entre uno y otro, ya que la onda gravitacional se mueve a la velocidad de la luz y esta tarda una centésima de segundo en recorrer la distancia entre ambos instrumentos. La observación de las señales observadas y sus diferencias temporales nos pueden decir tanto la masa inicial de los agujeros negros como su masa final tras la fusión, además de la distancia a la que se ha producido el evento.

El diseño y construcción de LIGO se llevó a cabo por los equipos de científicos e ingenieros del Instituto de Tecnología de California (Caltech) y el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), junto con las más de 80 instituciones y 900 científicos de todo el mundo que son miembros de la colaboración científica LIGO. Las responsabilidades del Laboratorio LIGO incluyen, además de las operaciones, la mejora de los detectores, la investigación en la física fundamental de la gravitación, la astronomía y astrofísica, y la educación y la divulgación. LIGO es hasta la fecha el mayor proyecto financiado por la Fundación Nacional de Ciencias de Estados Unidos, con más de seiscientos millones de dólares invertidos.



Vista aérea del interferómetro de LIGO en Hanford, estado de Washington, EE. UU.

Los físicos no tuvieron dudas al respecto porque llevaban décadas estudiando qué tipo de señal podría provocar qué fenómeno, y la primera que detectó LIGO, el 14 de septiembre de 2015 a las 09:50:45 UTC, bautizada oficialmente GW150914, fue «de libro»: «Lo observado coincide de forma muy bella con lo predicho», dijo Thorne en la rueda de prensa. Él lo sabe bien, porque en su obra *Agujeros negros y tiempo curvo: el escandaloso legado de Einstein*, publicado en 1994, imagina exactamente una tormenta en el espacio-tiempo causada por dos agujeros negros que se fusionan. «¡Todo estaba tal cual en su libro!», dijo con admiración Reiner Weiss, en la actualidad profesor emérito del MIT y uno de los padres de LIGO, también presente en el acto de anuncio.



Simulación de dos agujeros negros fusionándose.

La tormenta espaciotemporal que provocó GW150914 fue muy breve y, como se ha dicho, muy intensa. Uno de los agujeros negros tenía una masa de 29 soles, y el otro, de 36. Ambos orbitaban el uno en torno al otro, y llevaban millones de años aproximándose, acelerando su giro cada vez más. LIGO percibió los instantes finales de su acercamiento, cuando ya completaban unas cinco vueltas cada segundo. En ese momento las ondas gravitacionales alcanzaban una frecuencia de 10 hercios (Hz), que iba en aumento a la par que crecía la fuerza de las mismas. Cuando los dos agujeros negros ya giraban 250 veces cada segundo, ambos se fusionaron en un único gran agujero de 62 masas solares. El proceso, medido desde la Tierra, no duró más de veinte milisegundos. Pero la tormenta que desató en el espacio-tiempo es de una intensidad inimaginable.

«Hasta ahora los científicos solo habíamos visto el espacio-tiempo en calma, como la superficie del océano en un día tranquilo. Nunca habíamos presenciado una tormenta con fuertes olas rompientes», comentó Thorne. Una tormenta en la que no solo el espacio se comprime y estira, sino también el flujo del tiempo «se acelera, después se ralentiza, después se acelera otra vez…». Y todo ello en mucho menos que un abrir y cerrar de ojos, para un observador externo.

La suma de 29 soles más 36 soles… Si alguien está haciendo la suma y no le cuadra es porque la masa que falta, tres masas solares, es la energía que se ha ido con las ondas gravitacionales. Cincuenta veces más energía que la emitida por todas las estrellas. «Increíble», dijo bajito, como para sí mismo, Thorne en la rueda de prensa.

El trabajo científico en que presentaron la detección, en la revista *Physical Review Letters*, el mismo día de la rueda de prensa, empieza justamente explicando cómo las ondas gravitacionales son un fenómeno largamente esperado:

En 1916, el año posterior a la formulación final de las ecuaciones de campo de la relatividad general, Albert Einstein predijo la existencia de ondas gravitacionales […]. Einstein se dio cuenta de que las amplitudes de las ondas gravitacionales serían verdaderamente pequeñas; es más, hasta la conferencia de Chapel Hill en 1957 —de la que enseguida hablaremos—, el debate sobre si las ondas gravitacionales eran una realidad física era importante.

No se puede negar: por racional que se sea, por escéptico que se sea respecto a las supersticiones y el pensamiento mágico, la coincidencia del anuncio de la detección de ondas gravitacionales con el centenario de su predicción por parte de Einstein… asombra a cualquiera.

De predicciones, dudas, y cuentas pegajosas

Lo que ocurrió en Chapel Hill, en Carolina del Norte (Estados Unidos) en 1957 fue curioso, e importante. Una anécdota previa a esta conferencia sirve para explicar por qué. En 1936, el propio Einstein había llegado a convencerse de que las ondas gravitacionales no existían realmente —«Junto con un joven colaborador he llegado al interesante resultado de que las ondas gravitacionales no existen», escribió en una carta a su amigo Max Born. Poco después, Einstein volvió a cambiar de opinión —un colega le había advertido de un fallo en su razonamiento—, pero las dudas sobre la realidad física de las ondas seguían persistiendo en la comunidad.

A la conferencia de Chapel Hill asistieron muchos de los físicos pioneros en el estudio de la relatividad general y sus implicaciones, pero también uno, al menos, que no era del área y que, de hecho, se sentía tan a disgusto con cómo se investigaba en ella que ni siquiera quería figurar como participante: en vez de con su verdadero nombre, Richard Feynman —que más tarde recibiría el premio Nobel de Física — se inscribió como *Mr*. Smith. Feynman aportó al debate un experimento mental que resultaría definitivo: si una varilla colocada en sentido transversal al frente de propagación de una onda gravitacional tuviera inserta una cuenta, esta se desplazaría hacia adelante y hacia atrás por efecto de la onda. Y si la varilla estuviera embebida en una sustancia pegajosa, el movimiento de la cuenta, por efecto de la fricción, acabaría generando calor. Lo que significa que la onda es real, no un artefacto matemático, puesto que tiene efectos físicos.

Tras la exposición de este argumento, apodado «de la cuenta pegajosa», por parte de *Mr*. Smith, el área perdió dudas y ganó ideas para desarrollar las primeras propuestas de detectores de ondas gravitacionales, en los años sesenta. El pionero en este terreno fue, en Estados Unidos, John Weber —mentor de Kip Thorne—, que llegó a construir detectores, pero de sensibilidad muy inferior a la necesaria —en la época, los años sesenta, no se sospechaba aún cuán sensibles deberían ser los experimentos—. En las décadas posteriores surgirían grupos muy activos en el área también en Europa y Rusia, pero la detección de ondas gravitacionales seguía siendo una región en cierto modo marginal de la física.

El área sufrió un inesperado pero muy bienvenido empujón en los años setenta, cuando dos astrónomos comprobaron indirectamente la existencia de las ondas gravitacionales. Joseph H. Taylor y Russell A. Hulse investigaban púlsares, un particular tipo de objeto astronómico que había sido descubierto menos de diez años antes, y que es de lo

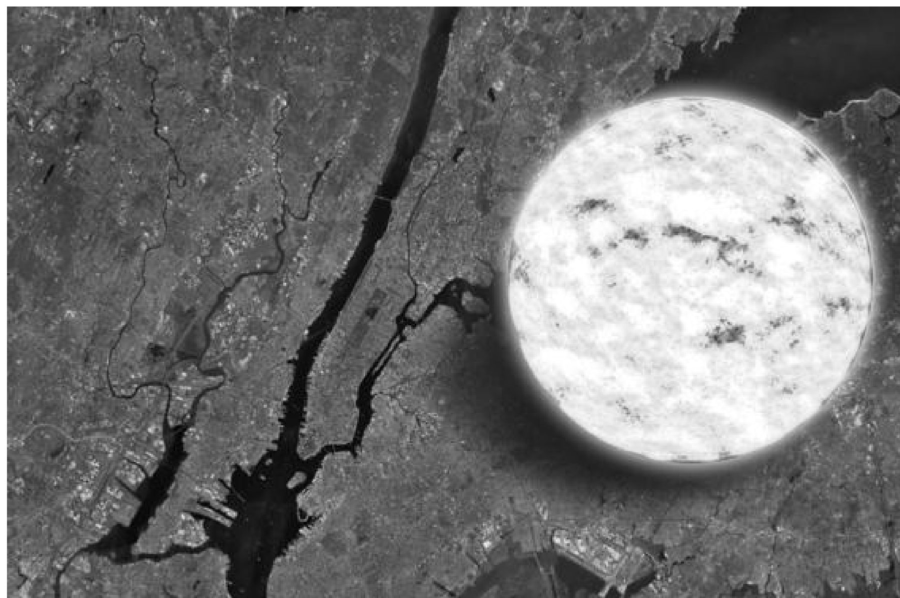
más sorprendente. Los púlsares son estrellas muertas que ya no brillan, y cuya masa, por efecto de su propia gravedad, se ha comprimido enormemente, hasta el punto de que su diámetro es de apenas unos kilómetros —la masa del Sol embutida en la ciudad de Madrid—. Pero además los púlsares giran con mucha rapidez, hasta miles de veces por segundo, y el efecto de ese movimiento sobre su campo magnético hace que emitan potentísimos chorros de radiación. Cuando, en su giro, el chorro de radiación baña la Tierra, lo que los telescopios detectan es un intenso pulso de radiación intermitente. En la práctica, los púlsares actúan como gigantescos faros cósmicos: brillan con gran intensidad, desaparecen y vuelven a aparecer. Su regularidad es tal que podrían usarse como relojes ultraprecisos. En el primero de ellos, descubierto en 1967, los pulsos se repetían cada 1,33 segundos; los astrónomos Jocelyn Bell Burner y Antony Hewish, llegaron a pensar que podía tratarse de una señal extraterrestre y apodaron al objeto LGM, por *little green men*, «pequeños hombres verdes».

El caso es que Taylor y Hulse, usando el famoso radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico —famoso porque su gran antena, de 305 metros de diámetro, ha aparecido en varias películas—, descubrieron un sistema formado por un púlsar y otro objeto muy similar que giran rápidamente uno en torno al otro a una distancia solo varias veces superior a la que hay entre la Tierra y la Luna. El sistema ofrecía un laboratorio natural para estudiar la predicción de Einstein de que dos masas que orbitan una en torno a la otra harán vibrar el espacio-tiempo con sus ondas gravitacionales. Así que Taylor y otro astrónomo, Joel M. Weisberg, observaron el sistema durante años y descubrieron que, efectivamente, ambos cuerpos se están acercando cada vez más el uno al otro porque pierden energía en forma de ondas gravitacionales. El cambio es muy pequeño, pero medible, y supone que dentro de 300 millones de años los dos objetos se fusionarán.

Taylor y Hulse recibieron el premio Nobel por su hallazgo en 1993. Y, como efecto secundario, los aspirantes a cazadores de ondas gravitacionales redoblaron sus esfuerzos, soñando con poder realmente medir el efecto del paso por la Tierra de una de esas tormentas en el espacio-tiempo. En la información ofrecida por la Fundación Nobel sobre el premio a Taylor y Hulse se hace referencia a ese objetivo, pero también a su dificultad.

El resultado de Taylor y Hulse puede ser visto como una prueba indirecta de la existencia de las ondas gravitacionales. Probablemente tendremos que esperar hasta el próximo siglo para obtener una demostración directa de su existencia. Ya hay muchos proyectos a

largo plazo para observar directamente las ondas gravitacionales que llegan a la Tierra. La radiación emitida por el púlsar binario es demasiado débil para ser observada desde la Tierra con las técnicas actuales. Sin embargo, cuando los dos objetos de una estrella binaria o de un púlsar binario caen el uno en el otro las perturbaciones resultantes en la materia son tan violentas, que sí podrían dar lugar a ondas gravitacionales observables aquí.



Comparación del tamaño de una estrella de neutrones típica con la zona central de la ciudad de Nueva York.

¿Palabras proféticas? El hecho es que hacia finales del siglo pasado ya estaban en construcción varios detectores basados en el mismo principio de LIGO. Entre 2002 y 2011, existía ya una red global de detectores en distintas partes del planeta: TAMA 300 en Japón, GEO 600 en Alemania, LIGO en Estados Unidos y Virgo en Italia. Los datos conjuntos de estos experimentos contribuyeron a establecer los requisitos de sensibilidad necesarios y a desarrollar la tecnología correspondiente, pero no detectaron nada.

Entre 2010 y 2015, LIGO fue sometido a un profundo proceso de mejoras. Gracias a las contribuciones de sus socios en el Reino Unido, Alemania y Australia, el nuevo *Advanced* LIGO aumentó su sensibilidad y el rango de frecuencias al que opera, lo que, de acuerdo con la teoría, debía permitirle detectar ondas producidas por fenómenos mucho más diversos.

LIGO y los agujeros negros «intermedios».

«Me resultó muy emocionante, por lo que representa en sí mismo y por la sensación de estar viviendo un momento histórico para la física», cuenta el investigador de agujeros negros Teo Muñoz-Darias (véase el capítulo «Cuando la gravedad agujerea…»), refiriéndose a la detección de ondas gravitacionales. Además de que «abre un nuevo campo» para la astronomía, «el descubrimiento constata que objetos tan exóticos como un sistema binario compuesto por dos agujeros negros existe en la naturaleza, y que es capaz de fusionarse en un tiempo menor que la edad del universo; eso tiene consecuencias astrofísicas muy interesantes».

No faltan las implicaciones para la física de las estrellas. Los agujeros negros de esta masa deben proceder de estrellas en las que hay menos materiales distintos del hidrógeno y el helio. En este tipo de estrellas —que los astrofísicos llaman «menos metálicas»—, los vientos que las estrellas masivas sufren al final de su vida «son menos efectivos, y por ello la estrella llega al momento del colapso con más masa y consecuentemente puede formar un agujero negro más masivo», dice Muñoz-Darias. «Nuevas detecciones de LIGO aclararán lo que realmente sucede».

Virgo es la versión europea de LIGO. En 2007 los equipos de LIGO y Virgo firmaron un acuerdo para compartir todos sus datos e incluso publicar en conjunto los resultados, y no por mero altruismo. Compartir los datos permite confirmar las detecciones —que ambos experimentos, tan distantes, emitieran la misma señal errónea es demasiado improbable— y además aporta información acerca del origen de la fuente: combinando los tiempos en que la onda llega a detectores situados en distintos puntos del planeta es posible acotar la región del cielo donde ha comenzado la tormenta espaciotemporal.

Virgo es un poco más pequeño que LIGO —los láseres perpendiculares tienen 3 kilómetros en vez de 4, pero el principio de funcionamiento es el mismo (véase el recuadro «Así funciona LIGO»). Nació a principios del siglo XXI como un instrumento inicialmente solo francés e italiano, situado cerca de Pisa, en Italia. Hoy participan en Virgo una veintena de laboratorios y más de 250 científicos en Francia, Italia, Holanda, Polonia y Hungría, y para garantizar las operaciones del instrumento a largo plazo se creó el Observatorio Gravitacional Europeo (EGO). El interferómetro empezó a recoger datos en 2007, y en 2016 comenzaron las observaciones coordinadas con LIGO.

La espera (de la confirmación)

Volvamos a la histórica primera detección de LIGO, el 14 de septiembre de 2015. Este hito demuestra que si ser escéptico —respecto a la posibilidad de detectar una señal predicha como

debilísima— es bueno, ser optimista es mejor. Todo ocurrió, dicho coloquialmente, nada más enchufar la máquina. La fase de calibración acababa de terminar y LIGO estaba observando en pruebas, una etapa previa a las operaciones científicas propiamente dichas. Eran las cuatro de la mañana hora local cuando la onda gravitacional GW150914, nacida hace 1300 millones de años en la violentísima fusión de dos agujeros negros, llegó a los dos detectores de LIGO, en Hanford (Washington) y Livingston (Luisiana). Se entiende así que fueran los científicos europeos los primeros en reaccionar a las alertas de los ordenadores.

Para Alicia Sintes, en Mallorca, ese lunes ya era «especial». Su grupo acababa de organizar los Encuentros Relativistas Españoles; uno de sus estudiantes, Alex Vañó, había defendido su tesis doctoral, y tenían como visitantes a futuros miembros del grupo. Por si fuera poco, «había obras en nuestro edificio y, además, ¡acababan de empezar las clases!», ha contado.

> En medio de todo esto, nuestro correo se comenzó a inundar con mensajes técnicos apuntando a unos resultados del sistema de análisis de datos en línea. Era algo muy extraño, ya que los detectores todavía estaban operando en modo de prueba y aún no había empezado de forma oficial el primer período de observación de *Advanced LIGO*. Pero el número de mensajes se incrementaba exageradamente, y eso que la mayoría de nuestros colegas americanos aún debían de estar durmiendo. Empecé a mirar enlaces. Todas las figuras correspondían a una señal proveniente del colapso de un sistema binario. Todo parecía muy extraño: ¡La señal era clara, de libro de texto!

El primer impulso fue preguntarse si estarían «poniendo a prueba» de nuevo la colaboración con otra inyección artificial a ciegas. Ya había ocurrido antes. Solo unos pocos miembros de la colaboración saben cuándo se somete al sistema a un simulacro, falseando una señal. Pero no podía ser. «Según la información de que disponíamos, el sistema de inyecciones estaba desconectado». Lo que era cierto es que la sensibilidad de los detectores ya era muy buena, en comparación con la de los detectores LIGO de primera generación. *Advanced LIGO* en su modo más inicial podía explorar un volumen veintisiete veces superior al del último período de observación de LIGO de finales de 2010.

> El caso es que cada vez más [miembros de la colaboración] comentaban los datos. Por la tarde, Sascha Husa y yo estábamos ansiosos de poder hablar con Miquel Oliver, nuestro estudiante de doctorado, que desde hacía dos semanas estaba haciendo turnos en la sala de control en el observatorio LIGO-Hanford, en el estado de Washington. ¡Teníamos que esperar a que se levantase!

Alicia, nacida en Menorca en 1969, estudió Física en la Universidad de las Islas Baleares y se convirtió en una «apasionada» de las ondas gravitacionales después de asistir a un curso de verano sobre ellas en Aberdeen (Escocia), en 1995. Realizó entonces una estancia postdoctoral de seis años en el Instituto Max Planck für Gravitationsphysik de Alemania, trabajando con el detector GEO600 de Hannover (Alemania). En 1997 participó en la puesta en marcha de la colaboración científica LIGO, y es miembro del Consejo de LIGO desde 2002. Sintes volvió a Mallorca, a la UIB, en 2002, como profesora en el área de Física Teórica, pero su participación en los grupos internacionales no mermó un ápice —«Pasaba medio año en Alemania y medio en Mallorca», dice—. Ha ocupado diversos puestos de responsabilidad en la comunidad internacional de Física Fundamental. También fue asesora científica de la Agencia Espacial Europea (ESA), y ha participado en la elaboración del programa de futuras misiones de la agencia. La detección de GW150914 fue para ella emocionante, pero en absoluto inesperada. En una entrevista concedida en 2009 comentaba: «Con estos detectores tenemos la esperanza de observar sobre el año 2015, o incluso antes, las ondas gravitacionales».

Sascha Husa también es investigador senior en el Grupo de Relatividad y Gravitación de la UIB, y a la sazón marido de Sintes. Es, igualmente, miembro del consejo de LIGO. Una parte sustancial de su investigación a lo largo de la última década se ha centrado en entender qué tipo de ondas gravitacionales —con qué propiedades— generará cada fuente y cómo será la señal que perciban los detectores. En concreto, Husa ha desarrollado modelos que no solo describen la fusión de dos agujeros negros de forma precisa, sino que pueden proporcionar soluciones con mucha rapidez gracias a los grandes ordenadores utilizados en el análisis de los datos de LIGO. Estos modelos resultaron esenciales para identificar el origen de la señal detectada por LIGO.

Él explica su trabajo con una metáfora:

> La idea básica es muy similar a la de aplicaciones de teléfonos inteligentes para identificar música [...]. Si escuchas una canción en un bar ruidoso, la aplicación puede consultar una base de datos de posibles señales, y usando algoritmos matemáticos para compensar el ruido, te dirá cuál se ajusta mejor. Mi trabajo consiste en hacer un catálogo de todas las posibles señales de ondas gravitacionales procedentes de la fusión de agujeros negros, para que los que analizan los datos puedan compararlas con las señales inmersas en ruido que son registradas por LIGO.

El 14 de septiembre de 2015, a primera hora de la tarde, Sascha

Husa vio en su correo electrónico «un largo hilo de correos electrónicos que había empezado alrededor de la hora de comer [...] con un título sugerente: un evento muy interesante en ER8 (el período de ingeniería 8, el período actual de pruebas, que acabaría convirtiéndose en período de observación)». El mensaje terminaba con una pregunta: «¿Puede alguien confirmar que no es una inyección de *hardware*?». Sascha Husa explica: «Era una manera educada de decir: "¿qué demonios está pasando aquí?"».

Más tarde, ya en casa, seguía controlando el correo. A las 20:29 recibió de su estudiante Miquel Oliver el mensaje más impactante que podía esperar.

No podía ser una inyección normal ni ciega. Tras comprobar los datos, el equipo había descubierto que era cierto. Miquel advirtió que esta información era completamente confidencial. «Me levanté del sofá y caminé al dormitorio, donde mi mujer, Alicia, la directora de tesis de Miquel, estaba leyendo: "Tenemos la primera detección, he hablado con Miquel, es real. Aún es confidencial, nada en las listas de *email*. Podemos hablar con él por Skype". No teníamos ni idea de lo que vendría los próximos meses, pero estaba claro que no dormiríamos mucho antes de Navidad».

Gran parte del trabajo del grupo de la UIB durante los meses transcurridos entre la detección y el anuncio se dedicó al análisis de la señal. Había que asegurarse de que no era ruido, y para eso fue necesario compararla con el fondo que percibe el detector durante dieciséis días completos —en coincidencia con dos detectores—. «Cuanto más tiempo observes el fondo, más seguro puedes estar de la señal», explica Sintes. El límite está en lo que los físicos llaman cinco sigmas: una certeza del 99,99995 %. El anuncio de la detección de GW150914 se realizó con una certeza de 5,1 sigmas. Y el trabajo incluyó, por supuesto, averiguar el tipo de fenómeno que generó la señal, en este caso, la fusión de dos agujeros negros. En el análisis de la señal, la colaboración LIGO invirtió 50 millones de horas de procesado, «como si 20 000 PC estuvieran trabajando durante 100 años», dice Sintes.

Uno de los aspectos más sorprendentes de esta primera detección de LIGO fue el alto grado de cohesión exhibido por la comunidad mundial de investigación en ondas gravitacionales durante los meses invertidos en verificar la naturaleza de la señal. En todo ese tiempo las filtraciones «extramuros» —a los no miembros de la colaboración— fueron consideradas rumores. ¿No es impresionante que, en la era de las redes sociales, más de mil personas distribuidas por todo el planeta hayan conseguido guardar tan bien un secreto, y además un secreto

tan emocionante?

A Sintes no le sorprende tanto. Sabe que quienes entran a formar parte de LIGO se comprometen a respetar la confidencialidad de los datos, y los modos de proceder del equipo: «Hay reglas del juego. Yo no puedo publicar lo que quiera ni decir lo que quiera, aunque lo firme solo con mi nombre», dice. Lo que está en riesgo es la credibilidad de un grupo internacional de científicos e ingenieros que persiguen un hallazgo del calibre de la detección de ondas gravitacionales; «hay que estar muy seguros cuando se habla de algo así».

El mundo se asombra

Las reacciones al anuncio en la rueda de prensa del 11 de febrero de 2016 no se hicieron esperar. Las redes sociales irrumpieron en una especie de *Wow* colectivo, recogiendo la emoción de dos de los padres de LIGO y de sus colegas. Reiner Weiss declaraba a *Nature*: «Al principio no podía creerlo. Solo cuando empecé a ver los datos…». Y Thorne: «Pensé: "Dios mío, este puede ser"». Stephen Hawking, gran amigo de Thorne —con quién había hecho varias apuestas—, declaró:

> Me gustaría felicitar al equipo de LIGO por su gran descubrimiento […] Este confirma varias predicciones importantes de la teoría de la relatividad de Einstein. […] Hasta ahora la relatividad general ha sido demostrada casi exclusivamente en campos gravitacionales débiles; este descubrimiento nos permite poner a prueba una predicción de la teoría de la relatividad general cuando el campo gravitacional es intenso y muy dinámico […] Estoy seguro de que el equipo de LIGO nos tendrá ocupados con muchas sorpresas más.

En España, el físico del CERN Álvaro de Rújula dio una conferencia en Madrid[3], en un gran salón de actos lleno hasta los topes. El momento cumbre de la velada fue cuando, ante el asombro primero, y después las risas y aplausos del público, De Rújula apareció con una careta del héroe de la noche: Albert Einstein, por supuesto.

De Rújula, Hawking, y muchos otros, resaltaron varias implicaciones del hallazgo. La primera, y quizás la más obvia, es que ya no puede quedar duda alguna de la existencia de los agujeros negros. Las evidencias de su presencia ya no son indirectas. Las ondas gravitacionales están hechas del mismo material que los agujeros y aportan pruebas inequívocas de su existencia. No se distorsionan al propagarse a través de la materia y, como consecuencia, proporcionan información detallada sobre los agujeros negros.

La otra gran implicación es más general: la detección de ondas gravitacionales tiene el potencial de revolucionar la astronomía. Hasta

ahora, nuestra forma de estudiar el universo ha explotado sobre todo la radiación electromagnética: la luz visible, infrarroja, las ondas de radio, los rayos X… Ahora se ha abierto «una nueva ventana al universo», explicó Thorne. «Y cada vez que se ha abierto una nueva ventana ha habido grandes sorpresas, porque cada forma de observar el universo revela cosas distintas: la ventana óptica es serena, la ventana de rayos X es violenta… Las ondas gravitacionales son tan diferentes de las electromagnéticas que creo que habrá sorpresas aún mayores».



Impresión artística de una explosión de rayos gamma o GRB.

Recreación de dos estrellas de neutrones en plena colisión.

Remanente de supernova situado a unos 160 000 años luz de la Tierra, en la galaxia de la Gran Nube de Magallanes.

LIGO Avanzado empezó su etapa inicial de observaciones científicas el 18 de septiembre de 2015, paradójicamente, cuatro días después de su gran hallazgo. «Desde entonces, en solo cinco años, se han detectado más de sesenta. Cada año ha sido revolucionario», me dijo Sintes en una entrevista para la Agencia SINC en septiembre de 2020. Y añadía: «¡Estamos solo al principio de lo que podemos detectar! Esto es un campo emergente que responderá muchas preguntas y abrirá otras».

El despegue de la astronomía de ondas gravitacionales

Después de la detección inaugural, LIGO y Virgo han captado dos señales especialmente importantes. Una de ellas, en 2017, corresponde a la fusión de dos estrellas de neutrones, que —y en esto reside el enorme impacto de la detección— pudo ser observada no solo por LIGO y Virgo, sino por otros 70 observatorios terrestres y espaciales sensibles a la radiación electromagnética, es decir, a la luz. «Fue precioso», me dijo Sintes. Por primera vez podían analizarse en la Tierra tanto las partículas de luz emitidas por un fenómeno astronómico, los fotones, como sus ondas gravitacionales. Igual que un detective entiende mejor un suceso si tiene versiones de distintos testigos, los astrofísicos investigan mucho mejor un fenómeno si ven tanto su firma electromagnética como gravitacional.

El 17 de agosto de 2017, LIGO captó una intensa señal de ondas gravitacionales desde el espacio. Casi al mismo tiempo, el telescopio espacial Fermi, de la NASA, detectó una explosión de rayos gamma. El *software* de análisis LIGO-Virgo consideró ambas señales de manera conjunta y concluyó que era improbable que fuera una coincidencia. Se lanzó entonces una alerta a observatorios en todo el mundo para que lo buscaran con sus detectores.

Los datos de LIGO indicaban que, a 130 millones de años luz de distancia de la Tierra, dos objetos habían estado aproximándose en órbitas espirales. Se estimó que debían tener entre 1,1 y 1,6 veces la masa del Sol, es decir, eran estrellas de neutrones. Las estrellas de neutrones tienen unos 20 kilómetros de diámetro y están hechas de un material tan denso que una cucharadita pesaría en la Tierra 1000 millones de toneladas.

La teoría dice que al colisionar estrellas de neutrones se emiten ondas gravitacionales y rayos gamma, junto con poderosos chorros de luz de longitudes de onda de todo el espectro electromagnético. Y, en efecto, solo horas después de lanzada la alerta internacional, observatorios de todo el mundo apuntaron a la región del cielo de donde debía proceder la señal y hallaron un nuevo punto de luz

parecido al de una nueva estrella.

Numerosos grupos de investigación españoles participaron desde distintas instituciones y con diversos instrumentos, en esta hazaña colaborativa de la comunidad astronómica internacional. Enrique Gaztañaga, del Instituto de Ciencias del Espacio (IEEC-CSIC), miembro de DES —Dark Energy Survey, véase el capítulo dedicado a la materia oscura—, declaró entonces: «Desde DES-Spain estamos muy emocionados con el descubrimiento de las contrapartidas ópticas de las detecciones de ondas gravitacionales. Es realmente un hito extraordinario para la ciencia, y abre una nueva ventana en la astrofísica y cosmología observacional». Juan García-Bellido, de la Universidad Autónoma de Madrid, destacó que «Horas después de la colisión, la cámara de DES descubrió de forma independiente la fuente en el visible e infrarrojo cercano, lo que ayudó a su localización en la galaxia NGC 4993».

La otra detección especialmente celebrada se produjo el 21 de mayo de 2019, aunque se anunció más de un año después porque —de nuevo— ante un evento tan especial los investigadores querían estar especialmente seguros. Esta vez se trataba de un suceso ocurrido hace 7000 millones de años —el tiempo que han tardado las ondas gravitacionales en llegar hasta nosotros—, cuando el universo tenía la mitad de su edad actual y el Sol, nuestra estrella, aún no existía. El evento en cuestión fue nada menos que el nacimiento de un agujero negro, el mayor jamás detectado y el primero al que se ve nacer de la fusión de agujeros negros progenitores. Nunca se había visto algo así. Por si fuera poco, los «padres» también eran especiales.

Sintes lo explicó así cuando la entrevisté para SINC:

> Hemos detectado un evento muy interesante, primero porque es una fusión de agujeros negros que da lugar al agujero negro más masivo que tenemos, nunca habíamos observado uno así. Y luego, porque nos hace replantearnos lo que sabemos sobre cómo se forman los agujeros negros, nos obliga a revisar los modelos de colapso estelar.

La rareza está en las masas de los actores implicados. El nuevo agujero negro tiene 142 masas solares y es, por tanto, el primero detectado en un rango intermedio de masas —ni estelar ni supermasivo—. Se sabe cómo se ha formado, porque se ha detectado la fusión de los agujeros negros progenitores. Pero estos últimos sí que son raros: tenían 66 y 85 masas solares, un rango de masas que no contemplan los modelos actuales de evolución estelar. Quizás también ellos fueron producto de varias generaciones de fusiones. Decir que LIGO/Virgo está cambiando nuestra visión del cosmos es,

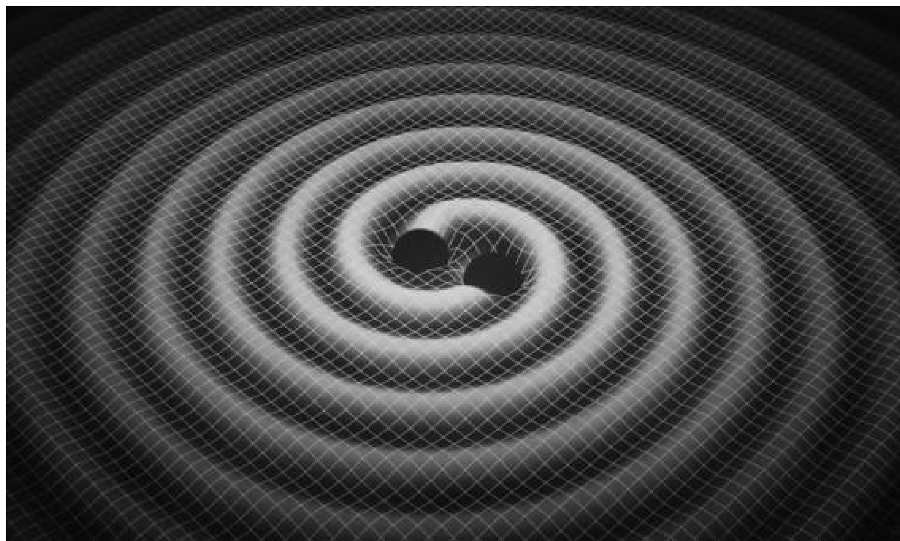
probablemente, quedarse corto.

Capítulo 5

Los sensores gravitacionales del futuro

El 22 de febrero de 2016, solo once días después del histórico anuncio de la detección de la vibración causada en el espacio-tiempo por una fusión de agujeros negros, la comunidad de investigadores de la gravedad celebró otro hito. Un logro desde luego no comparable en importancia, pero relevante por lo que significa para el futuro. Una hazaña tecnológica consistente en haber colocado a un millón y medio de kilómetros de distancia, en un punto en el espacio entre la Tierra y el Sol, dos cuerpos en perfecta caída libre. En concreto, dos cubos de oro y platino de 46 milímetros de arista, apodados —para más detalles — Jake y Elwood en recuerdo de los Blues Brothers, y que están exactamente a 38 centímetros de distancia entre sí, flotando sueltos en el vacío del espacio exterior. Que estén en caída libre es otra manera de decir que lo único que influye en su movimiento es la fuerza de la gravedad.

Haber conseguido ponerlos ahí es un primer paso hacia la detección de ondas gravitacionales en el espacio. Los cubos flotantes constituyen el corazón de la misión espacial LISA Pathfinder, de la Agencia Espacial Europea (ESA). Muchos han preguntado a los ingenieros y científicos de LISA Pathfinder si lo tenían planeado, si ajustaron el calendario de su misión al anuncio de la detección de ondas gravitacionales por parte de LIGO. La respuesta es no.



Modelo de ondas gravitacionales en el tejido del espacio-tiempo producidas por dos agujeros negros en proceso de fusión.

Probablemente, ni siquiera si el equipo de LISA Pathfinder hubiera estado al tanto del descubrimiento de LIGO habría podido hacer cambios en los planes de una misión calculada al milímetro desde hace años. Pero, además, es que LISA Pathfinder no conocía el secreto de LIGO. Desde luego hay expertos que participan en ambos proyectos, como Karsten Danzmann, coinvestigador principal de LISA Pathfinder. Pero, como cuenta el jefe de misión de LISA Pathfinder, César García Marirrodriga, por teléfono desde ESTEC, el centro tecnológico de la ESA, en Holanda, «la cooperación LIGO ha mantenido los datos y resultados con mucho sigilo a pesar de estar compuesta por más de mil personas».

Por supuesto, ningún miembro del equipo de LISA Pathfinder cuestionó que el secreto era «necesario y deseable para analizar los datos con tranquilidad de manera exhaustiva e independiente», dice García Marirrodriga, pero, al mismo tiempo y también, por supuesto, nada impidió que durante las semanas previas al anuncio de LIGO, mientras arreciaban los rumores sobre la posible detección de ondas gravitacionales, los «agentes dobles» como Danzmann se convirtieran en objeto de la curiosidad de sus colegas: «Confieso que pregunté un par de veces a Karsten. Él, muy discreto y educado, me respondía con pistas indirectas. Aunque ¡se le notaba en la cara!», prosigue García Marirrodriga, que se declara, por su parte, admirado con el hallazgo de LIGO: «¡La sensibilidad de LIGO es increíble! Y además no todos los días hay un fenómeno tan increíblemente energético como dos agujeros negros fusionándose».

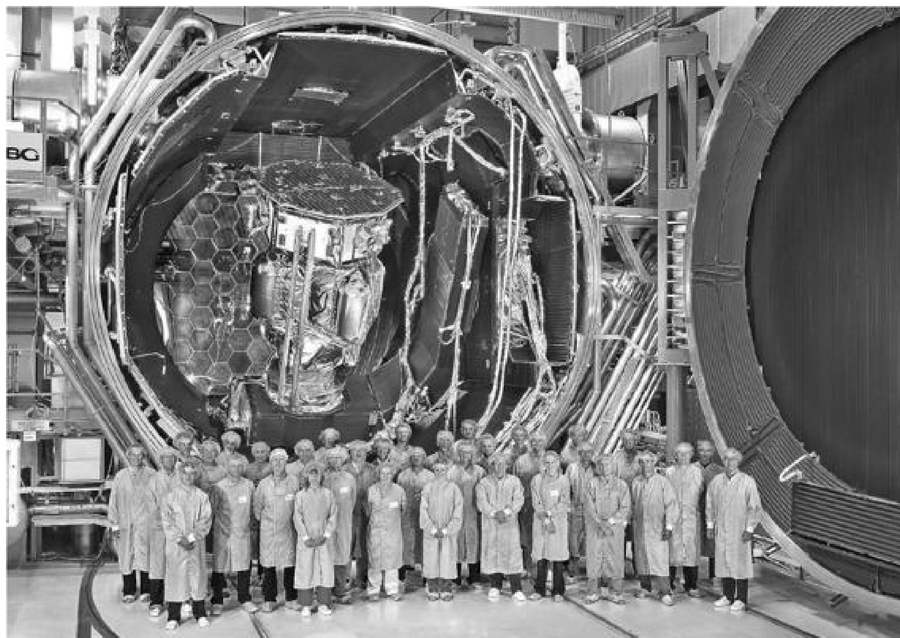
Así que, por una vez, hay que creer en la casualidad. Perdón, no por una vez, sino ¡por dos! La primera es, como ya saben, la coincidencia de la detección de LIGO con el centenario de la publicación de la teoría de la relatividad general. El hecho es que LIGO lleva décadas gestándose y preparándose para cazar una señal como GW150914. Y LISA Pathfinder también existe desde hace mucho sobre el papel. Ambos proyectos han superado obstáculos importantes y sufrido retrasos. «Por eso es una coincidencia virtuosa que en el transcurso de un par de meses ambos instrumentos produzcan resultados», dice García Marirrodriga.

El éxito de la misión LISA Pathfinder, operativa hasta mediados de 2017, ha sido muy celebrado por la comunidad. Tras su lanzamiento en diciembre de 2015, tardó seis semanas en llegar a su destino, una órbita en torno a un punto virtual en el espacio entre la Tierra y el Sol llamado Lagrange 1,donde la gravedad de planeta y estrella se contrarrestan. Una vez allí comenzaron las delicadísimas maniobras —orquestales— en la oscuridad. Los ocho «dedos» robóticos que hasta entonces habían mantenido los cubos de oro y platino firmemente agarrados fueron retirados, y aquellos quedaron en contacto solo con un par de varillas; después se abrió una válvula para que cualquier molécula residual saliera al espacio, de forma que se hiciera el vacío en torno a los cubos. Finalmente se retiraron también las varillas. Dos pequeños cubos metálicos idénticos empezaron a flotar sueltos en el silencio del espacio, a menos de medio metro de distancia.

Jake y Elwood. ¿Es o no es poético?

A mediados de la misión, García Marirrodriga describía así su vivencia:

> La operación de soltar las dos masas fue sin duda la más crítica, porque no era posible ensayarla completamente en tierra debido a las fuerzas y movimientos tan pequeños implicados. Pero LISA Pathfinder está funcionando excelentemente. La órbita es la adecuada, justo un poquito más acá del punto de equilibrio de Lagrange 1. La presión de la radiación solar empuja el satélite hacia atrás, hacia la Tierra. Por eso una vez a la semana usamos los microcohetes para contrarrestar la presión solar y volver al punto de equilibrio. El ambiente de trabajo es espléndido: ingenieros del satélite, científicos e ingenieros de operaciones con un mismo objetivo. El buen ambiente es no solo el resultado de lo bien que va todo, sino más bien la causa de que así sea. Han sido muchos años de trabajo conjunto. Ahora todos queremos ver los mejores resultados posibles.



Pruebas de cualificación de LISA Pathfinder antes de su lanzamiento.

Poético, sí. Aunque no debemos imaginar dos insignificantes cubitos flotando en mitad de la nada. Alrededor de Jake y Elwood, envolviéndolos, pero, por supuesto sin tocarlos, está todo el satélite LISA Pathfinder, equipado con la instrumentación necesaria para cumplir su objetivo: demostrar que es posible desarrollar la tecnología con que otra ambiciosa misión espacial podrá, en un futuro no muy lejano, detectar ondas gravitacionales en el espacio. LISA Pathfinder debe «proporcionar a la comunidad de ondas gravitacionales la seguridad necesaria para construir el primer observatorio de ondas gravitacionales en el espacio», explicaba la web de la misión.

Lo que contaría una onda gravitacional detectada en el espacio

En Tierra ya hemos visto lo complejo que es cazar ondas gravitacionales: se necesitan detectores capaces de percibir variaciones en distancia entre dos puntos mucho menores que el diámetro de un protón. En el espacio hace falta un grado de sensibilidad equivalente y, además, superar las dificultades inherentes a operar una máquina situada a más de un millón de kilómetros de distancia. Aun así, los científicos no tienen dudas de que vale la pena estudiar si es posible desarrollar la tecnología para detectar ondas gravitacionales en el espacio. Lo que hay en juego es realmente gordo.

Igual que ocurre con la radiación electromagnética, esto es, la luz, la longitud de las ondas gravitacionales varía en función del tipo de fenómeno que las genere: las explosiones de supernova o la fusión de agujeros negros estelares, provocan ondas gravitacionales como las que detectó LIGO; en cambio, la fusión de agujeros negros supermasivos, de miles de millones de masas solares, como los que hay en el centro de las galaxias, generan ondas gravitacionales que solo pueden ser detectadas desde el espacio, con instrumentos capaces de medir cambios minúsculos en la distancia entre puntos muy alejados entre sí.

El tipo de misión espacial que podría detectar estas ondas, y con la que sueñan desde hace años los ingenieros, es eLISA —de Evolved LISA, o «LISA Evolucionado»— (véase el recuadro «Así se detectarán las ondas gravitacionales desde el espacio»). Evolved LISA se lanzaría, según los planes de la ESA, hacia 2030.

«Los futuros observatorios de ondas gravitacionales, como eLISA, serán sensibles a fenómenos que LIGO no puede ver, como espirales de agujeros negros supermasivos, los que están en el centro de las galaxias. Son fenómenos que generan ondas de baja frecuencia —o período largo—, al contrario que los que ve LIGO», explica César García Marirrodriga. Como referencia, la señal de LIGO duró 0,2 segundos, y las frecuencias de la fusión de los dos agujeros negros fueron en torno a los 100 Hz —un período de 0,01 segundos—.

Los números de LIGO son fantásticos: indican que dos cuerpos, cada uno de unas 30 veces la masa del sol, están girando el uno alrededor del otro unas cien veces por segundo, a velocidades de 0,6 veces la de la luz. Por contraposición, eLISA analizará señales de baja frecuencia, entre 0,0001 y 0,1 Hz —períodos de 10 000 segundos, o 3 horas—. Hay muchas fuentes en esas bajas frecuencias en el volumen detectable, así que siempre habrá muchas señales.

La nueva misión eLISA también podría detectar algunos de los fenómenos que ve LIGO, pero podría hacerlo antes que él. Por ejemplo, la fusión de agujeros negros que detectó LIGO podría haber sido medida por eLISA hace unos cuatro años.

Así se detectarán las ondas gravitacionales desde el espacio

LISA es el acrónimo en inglés de *Laser Interferometer Space Antenna* («Antena Espacial de Interferómetro Láser»), un proyecto nacido a principios de este siglo por parte de las agencias espaciales estadounidense (NASA) y europea (ESA). Su objetivo era desarrollar y operar un avanzado detector de ondas gravitacionales en el espacio. LISA sería capaz de detectar estas ondas

mediante la medición de cambios en la separación entre unas masas de referencia a bordo de tres naves espaciales situadas a 5 millones de kilómetros de distancia mutua.

La información que LISA proporcionaría nos daría una visión única de fenómenos extraordinarios, como se ha podido comprobar gracias a las históricas observaciones de LIGO en septiembre de 2015. LISA haría un seguimiento en el tiempo de las fuentes de las ondas gravitacionales, para refinar la posición y la distancia de estos fenómenos y facilitar su detección con otros instrumentos en el espectro electromagnético.

Sin embargo, LISA sufrió un serio contratiempo en 2011, cuando la NASA anunció que sería incapaz de participar en el proyecto por limitaciones de financiación. La Agencia Espacial Europea revisó el concepto de la misión para encajarlo en otro proyecto al que ha llamado eLISA (de *Evolved LISA*, «LISA Evolucionado»), que se lanzaría no antes de 2034.

La misión eLISA consta de tres naves que volarán formando un triángulo equilátero de un millón de kilómetros de lado, describiendo una órbita en torno al Sol parecida a la terrestre. La misión observará las ondas gravitacionales midiendo los minúsculos cambios —de hasta solo un picómetro, la billonésima parte de un metro— que puedan darse en la longitud de los lados del triángulo, empleando interferometría láser. Cada una de las tres naves espaciales de eLISA contiene dos telescopios, dos láseres y dos masas de referencia de platino y oro, dispuestos en dos conjuntos ópticos apuntando a las otras dos naves espaciales. La distancia lineal media entre la flotilla de naves y la Tierra será de hasta unos 70 millones de kilómetros. Para eliminar las fuerzas no gravitacionales, como la ligera presión que ejercen las partículas emitidas por el Sol en los tres satélites de eLISA, cada nave espacial se construye de modo que las masas flotan libremente en su interior, usando sensores para determinar su posición con respecto al cuerpo de la nave y propulsores muy precisos para mantenerlas en el centro de los satélites. La tecnología en la que se basa eLISA debía antes ser demostrada por la misión precursora LISA Pathfinder.



Esquema de los tres satélites que componen la flotilla de eLISA.

Para entender este aspecto, y también la diferencia entre ondas de baja frecuencia —y período largo— y ondas de alta frecuencia —y período corto—, se puede imaginar dos varas girando la una alrededor de la otra, verticalmente, en la superficie de un estanque; si están a

muchos metros de distancia entre sí y giran lentamente, las varas generan olas más bajas y espaciadas —baja frecuencia y período largo — que si están a pocos centímetros y giran muy rápido —olas de alta frecuencia y período corto—. Hace cuatro años, los agujeros negros detectados por LIGO estaban lo bastante separados y giraban lo bastante despacio —en términos relativos— como para haber sido detectados por eLISA, de haber estado esta misión en funcionamiento. En cambio, a medida que fueron aproximándose y acelerando su giro, habrían dejado de ser visibles para eLISA —entrando en cambio en territorio de LIGO—.

Una tecnología absolutamente nueva

Poco después de que Jake y Elwood quedaran sueltos en el espacio-tiempo, LISA Pathfinder empezó su período de operaciones científicas. Antes de entrar en lo que tiene que hacer LISA Pathfinder para demostrar cómo funciona la tecnología de detección de ondas gravitacionales, hay que aclarar por qué los cubos deben estar en caída libre. La razón es sencilla: si el movimiento de estas masas se debe única y exclusivamente a la fuerza de la gravedad, o, lo que es lo mismo, a la curvatura del tejido del espacio-tiempo, entonces cualquier variación en el movimiento de los cubos se deberá a cambios en esa curvatura. Y los cambios en la curvatura del espacio-tiempo son justamente lo que interesa detectar si se está a la caza de ondas gravitacionales.

Sin embargo no es nada fácil conseguir mantener una masa en el espacio en perfecta caída libre. Hay fenómenos, por ejemplo, la radiación solar, que la empujan constantemente. Y está el propio satélite, que también genera fuerzas eléctricas y magnéticas que pueden afectar el movimiento de Jake y Elwood —por no hablar de la gravedad de la nave, un «ruido» que interfiere con la señal de una eventual onda gravitacional—.

Así que hay un problema. No es posible prescindir del satélite, que protege a las masas en caída libre actuando como escudo frente a la radiación solar —por ejemplo—, y que además es indispensable para transportar los instrumentos de medida. Pero, al mismo tiempo, el satélite puede emborronar justo la señal que se está persiguiendo.

LISA Pathfinder hizo frente a ese problema. Su misión consistió en demostrar que es posible aislar de todas las fuerzas imaginables, exceptuando la gravedad, las dos masas en caída libre que celosamente guarda en su interior. Para acercarse a su objetivo, los creadores de LISA Pathfinder cumplieron requisitos muy exigentes, que hicieron de esta nave una de las más ambiciosas desde el punto de

vista tecnológico. Por ejemplo, se evitó usar cualquier clase de materiales magnéticos en la nave, y cuando esto era imposible, los imanes se colocaron lo más lejos posible de los cubos y de manera que los campos magnéticos se anularan entre sí. Los cubos, por cierto, están hechos de oro y platino justamente porque la susceptibilidad magnética de la mezcla resultante es prácticamente nula. También, la propia masa del satélite tuvo que ser equilibrada de tal manera que el campo gravitacional no influyera en las masas.

En general, de todo componente de la nave hubo que registrar de modo preciso masa y posición. La posición de piezas situadas a un metro de distancia de las masas fue determinada literalmente al milímetro; en el caso de componentes próximos a las masas, la posición se ha medido con una precisión de decenas de micras (millonésimas de metro). Hubiera bastado con que un cable se desplazara unos pocos milímetros para desequilibrar el satélite, por la masa del hilo de cobre. La ESA informó de que los ingenieros de la misión, durante la construcción de la nave, «tuvieron que registrar con un grado de precisión sin precedentes todo lo que entrara o saliera del satélite» en un documento de cientos de páginas. Este registro sirvió para construir un modelo del campo gravitacional de LISA Pathfinder, según el cual la gravedad de la nave sobre las masas fue de «solo una décima de una milmillonésima de la gravedad de la Tierra».

Una vez mantenidos Jake y Elwood en perfecta caída libre, LISA Pathfinder voló a su alrededor sin tocar ambas masas; para ello, los sensores de la nave medían continuamente la posición de estas, y la nave respondía instantáneamente a dichas medidas corrigiendo su posición mediante propulsores capaces de ajustes increíblemente delicados.

Pero los sensores de LISA Pathfinder también midieron el movimiento relativo de las masas entre sí. Sin nada que las altere, ambas se desplazaban en perfecta sincronía; pero si alguna fuerza las molestaba, los sensores de la nave percibían una aceleración entre ellas. La precisión de esta medida debía ser de picómetros (millonésimas de millonésimas de metro). Para lograrla, la nave recurrió a un método similar al empleado en LIGO: un interferómetro láser. Un haz láser se divide en dos, que rebotan en los cubos y son recombinadas de nuevo; los cambios en el haz láser después de unirse de nuevo delatan movimientos relativos.

LISA Pathfinder no fue diseñada para percibir el paso de una onda gravitacional. El tipo de onda que se puede cazar con un detector con la sensibilidad de LISA Pathfinder —y de una futura eLISA— tiene, como se ha dicho, un período muy largo, y requiere de masas situadas

a, como mínimo, un millón de kilómetros de distancia. Es decir, para un único satélite, como LISA Pathfinder, es imposible detectar ondas gravitacionales.

Lo que sí debía hacer LISA Pathfinder era entender qué puede afectar al movimiento de las masas en caída libre, y cómo. Los posibles cambios en el movimiento relativo de los cubos en LISA Pathfinder solo podían deberse a los factores que, además de las ondas gravitacionales, pueden causar ruido en la señal. Solo caracterizando ese ruido será posible purificar la señal cuando llegue el momento.

Que será… ¿Cuándo? César García Marirrodriga cree que las novedades de LIGO acelerarán los planes de lanzar una misión tipo eLISA.

Además de LISA Pathfinder, la ESA está desarrollando otros aspectos de la tecnología necesaria para la detección de ondas gravitacionales en el espacio, como láseres de más potencia para cubrir la distancia de un millón de kilómetros entre los satélites de la constelación LISA. «Según el plan actual, la ESA lanzaría el observatorio en los años treinta. ¡Pero algunos no podemos esperar!», dice García Marirrodriga.

Y ahora… las ondas del big bang

Por increíble que parezca, en este punto del relato sobre ondas gravitacionales cabe decir: ¡no se vayan todavía, aún hay más! Las implicaciones que tiene el poder detectarlas son tantas que alcanzan incluso a nuestro conocimiento sobre el origen del universo. Es más, las ondas gravitacionales podrían aportar algunas de las piezas más importantes, aún pendientes, para explicar los primerísimos instantes de existencia del cosmos.

El modelo hoy día más aceptado para describir cómo empezó todo es el del *big bang*: en sus inicios, el universo era muchísimo más pequeño, denso y caliente de lo que es ahora. Los propios cosmólogos, para ilustrar las dimensiones del universo primigenio hablan de una pepita, un guisante, una mota, son todo metáforas para referirse a dimensiones microscópicas. En un momento determinado, hace unos 13 800 millones de años, ese minúsculo grano empezó a expandirse y a enfriarse, y se desencadenó así la secuencia de acontecimientos que llevan al universo que hoy conocemos: frío —en el espacio exterior, en todo el universo, la temperatura es de unos 270 ºC bajo cero—, y con grandes acumulaciones de materia —planetas, estrellas, galaxias, cúmulos y supercúmulos de galaxias— separadas por vastas regiones vacías, en una estructura como de espuma o pompas de jabón.

Es un modelo que se basa en evidencias tan sólidas, obtenidas por

vías tan diversas y a pesar de ello coincidentes, que los cosmólogos, de forma unánime, la consideran demostrada. De hecho, la cosmología del *big bang* está hoy tan consolidada que es difícil recordar que hace apenas cinco décadas no lo estaba en absoluto. Es decir, nuestra visión de cómo empezó el cosmos no tiene nada que ver con la que tenía Einstein cuando empezó a trabajar. Hasta bien entrada la segunda mitad del siglo pasado, la teoría de que el universo empezó con algo que hoy llamamos «gran explosión» tenía tantos partidarios como otra, llamada «del universo estacionario», para la que el cosmos era una realidad estática. Seguramente ya conocen la irónica historia de que el término *big bang* fue acuñado por uno de los detractores de la teoría, Fred Hoyle, como burla.

El descubrimiento que inclinó la balanza del lado del *big bang* se produjo en 1964, de forma casual. Y, de la misma forma que había ocurrido cuando se descubrieron las radiofuentes —véase el capítulo «Cuando la gravedad agujerea…»—, la compañía de teléfonos estadounidense Bell tuvo un papel crucial. Arno Penzias y Robert Wilson, dos radioastrónomos que trabajaban para los laboratorios Bell, probaban una antena de comunicaciones en Nueva Jersey, Estados Unidos, cuando detectaron una persistente señal que interpretaron como ruido. Tras revisar las que consideraban posibles fuentes emisoras —entre ellas excrementos de paloma en la antena—, Penzias y Wilson concluyeron que la señal provenía del cielo, pero no de una fuente concreta sino de «todo» el cielo, de más allá de nuestra propia galaxia. Por entonces, y no muy lejos de allí, había un grupo de astrónomos que sí hubiera sabido interpretar la señal, porque precisamente la estaban buscando. Ellos habían predicho que, si el universo había empezado en una gran explosión caliente, entonces debía ser detectable todavía hoy, en todo el cielo, una luz emitida relativamente poco después del inicio de la expansión.

Esa es la señal que estaban detectando Penzias y Wilson: la radiación de fondo cósmico de microondas. La prueba definitiva de que el universo nació como una micropepita de energía y materia que empezó a crecer.

La radiación de fondo es la luz más antigua que pueden detectar los telescopios, emitida unos 380 000 años después del *big bang*. Se llama «fondo» porque llena todo el cielo y porque como es la luz más primitiva es también la más lejana, y, por tanto, se ve detrás de todos los demás objetos en el cosmos —como un decorado o un papel de pared—. Como referencia, las galaxias más primitivas se formaron varios cientos de millones de años más tarde. Cuando la radiación de fondo cósmico empezó a llenar el cielo, el universo era mucho más

caliente y pequeño que en el presente; a medida que el universo se expandía, la propia longitud de onda de la radiación de fondo se estiraba —al fin y al cabo, seguía llenando todo el universo, y mientras que el universo ampliaba su volumen, no había más radiación de fondo; imaginen pintar una onda en la superficie de un globo deshinchado, y qué ocurre con el dibujo cuando se hincha el globo—. Ese estiramiento de la longitud de onda de la radiación de fondo es la razón de que el ojo humano no pueda verla, pero sí los detectores de microondas, como el instrumento de Penzias y Wilson.

Los cosmólogos saben que esta luz contiene información de gran valor sobre los primeros instantes del universo. Tiene, por ejemplo, la huella que dejaron en la radiación los grumos de materia que, con el tiempo y la expansión, y gracias a su atracción gravitacional —he aquí de nuevo la gravedad «constructora»—, fueron atrayendo más y más materia y acabaron dando lugar a las galaxias y agrupaciones de galaxias que observamos hoy. Estas semillas de galaxias no son una hipótesis, sino una certeza: han sido detectadas claramente mediante telescopios destinados en exclusiva a medir la radiación de fondo en todo el cielo.

Pero lo que nos ocupa ahora es que la radiación de fondo debería tener también —y esto sí es aún una hipótesis— la marca que debieron dejar las ondas gravitacionales generadas instantes después del *big bang,* durante una brevísima fase de la expansión del universo llamada «inflación».

La inflación es uno de los puntos aún pendientes por demostrar en el modelo cosmológico de la gran explosión. Y es un aspecto clave, porque si se probara que efectivamente sucedió se resolverían varios problemas que aún presenta la teoría. Si la inflación ocurrió, entonces, durante unos instantes justo después de iniciado el *big bang,* el universo se expandió mucho más rápido de lo que seguiría haciéndolo después, mucho más rápido incluso que la velocidad de la luz. Algo así como el globo de antes hubiera pasado de la flacidez a ser casi una esfera en menos de un parpadeo, para seguir después creciendo a un ritmo mucho más pausado.

Eso aclararía el misterio de que el universo sea demasiado «igual». Si se mira hacia una dirección del cielo, y luego se da media vuelta y se mira al lado opuesto, lo que se ve es muy parecido: galaxias y agrupaciones de galaxias separadas por vastos vacíos. Una metáfora habitual es esta: si el universo fuera un plato de sopa, lo que se ve es que el líquido está a prácticamente la misma temperatura en todas las partes del plato. Es lo que cabe esperar cuando las moléculas de sopa están en contacto y se transmiten el calor unas a otras. Sin embargo,

los bordes del universo conocido están separados casi 28 000 millones de años luz, mientras que la edad del universo es de solo 13 800 millones de años. Es decir: no ha habido tiempo para que la energía se distribuya uniformemente por todo el universo, como el calor en la sopa. A la luz no le ha dado tiempo de conectar y de igualar ambas regiones. Y es demasiado improbable que todas las regiones hayan evolucionado igual de forma independiente.

En cambio, si asumimos que el universo recién nacido pasó por una fase de expansión mucho más rápida que la velocidad de la luz, ya no hay problema: las regiones hoy distantes pudieron estar conectadas en el pasado, y eso explicaría su homogeneidad.

Todo lo anterior conduce a la importancia de las ondas gravitacionales primordiales: detectarlas implica demostrar la inflación. La teoría postula que la inflación generó ondas gravitacionales, vibraciones que, como ya se ha visto, comprimían el espacio-tiempo en una dirección y lo estiraban en el otro. Ese proceso de acordeón que gira habría dejado su huella en la radiación de fondo de microondas.

Así pues, en esta ocasión se trata de detectar ondas gravitacionales no percibiendo los cambios en el espacio-tiempo en sí —lo que hizo LIGO y lo que quiere hacer eLISA—, sino leyendo las marcas dejadas por el movimiento del espacio-tiempo en la radiación de fondo.

Esas marcas son lo que los astrónomos creyeron haber detectado en marzo de 2014. Lo creyeron, pero solo durante unos meses. Lo que sigue es la historia de uno de los no descubrimientos más sonados de la astrofísica reciente. Un jarro de agua fría, una montaña rusa, un desencanto… se han usado muchos calificativos para referirse a algo que empezó, también, con una rueda de prensa.

¿Atisbos de una «gravedad cuántica»?

Es probable que, durante los primeros momentos de su existencia tras el *big bang*, el universo atravesara un breve período de expansión rapidísima llamado «inflación», en el que se generaron ondas gravitacionales primordiales. Es probable, pero no seguro. Demostrar que hubo una inflación es difícil, porque la temperatura del universo entonces —y, por tanto, la energía de las partículas elementales— era miles de millones de veces más alta que la que se puede lograr en Tierra.

Las ondas gravitacionales primordiales que se originaron durante la inflación todavía reverberan en el universo, y se puede buscar su huella en la denominada «radiación cósmica de fondo», una luz emitida poco después del *big bang* y que llena todo el cielo. Si se logra observar estas ondas gravitacionales primordiales, nos dirán la escala de energía a que se produjo la inflación.

Debido a que la inflación es un fenómeno cuántico y las ondas gravitacionales son parte de la física einsteniana, estas ondas primordiales pueden establecer un vínculo entre esos dos mundos, el de la cuántica y la física, y podría ser la primera evidencia de que la gravedad tiene una naturaleza cuántica al igual que las otras cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza.

Un no descubrimiento famoso

Fue el 17 de marzo de 2014, en el Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, en Cambridge, Massachusetts (Estados Unidos). «Hoy vamos a anunciar la detección de los modos B de polarización por parte del telescopio BICEP2, [una detección] que encaja muy bien con las predicciones de la teoría», dijo el astrofísico John Kovac, director de la colaboración BICEP2. «Detectar esta señal es uno de los objetivos más importantes de la cosmología actual. Mucho trabajo, de mucha gente, nos ha traído hasta aquí».

Tras el anuncio, y como en el más reciente caso de la detección de ondas gravitacionales por parte de LIGO, los medios se llenaron de comentarios de expertos de todo el mundo celebrando el resultado emocionados. La repercusión mediática fue «inflacionaria» —perdón, irresistible la tentación de usar este adjetivo— y, visto *a posteriori*, probablemente descuidada a la hora de recordar que el hallazgo debía aún ser confirmado con más medidas. Aunque nunca se sabrá si fueron los propios científicos en sus comentarios o los medios quienes no resaltaron lo bastante este punto. El prestigioso periodista y divulgador Dennis Overbye sí lo señalaba, en un artículo en *The New York Times* publicado poco después de la rueda de prensa: «Si se corrobora, el trabajo del Dr. Kovac quedará como un hito de la ciencia comparable al reciente descubrimiento de la energía oscura, que separa el universo, o el del propio *big bang*».

Pero lo que llegó poco después no fue la ansiada confirmación de ese resultado, sino la constatación de que esta era imposible: un jarro global de agua fría. Hoy por hoy sigue siendo un misterio si el universo sufrió o no una inflación en sus primeros instantes de existencia.

En 2015 Kovac dio una conferencia en Madrid [4] y explicó lo que él vivió como una auténtica montaña rusa. Primero habló del escenario. Los telescopios de la serie BICEP son una colaboración del Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics y las universidades de Minnesota, Caltech y Stanford, y están instalados en el Polo Sur.

No es un lugar especialmente cómodo, pero sí, «enormemente bello», con el espectáculo de las auroras polares y un cielo que es lo más parecido a estar en

el espacio sin despegar los pies de la Tierra. El sol se pone en marzo, y sabes que no saldrá de nuevo hasta seis meses después. El lugar se vuelve como de otro planeta. El aire es el más frío de la Tierra, a -70 ºC, también es el más seco. Y es casi transparente a la radiación de microondas, que es la que deben detectar nuestros telescopios.

En otras palabras, las dificultades logísticas quedan compensadas por la gran calidad del cielo para este tipo de observaciones. Kovac lleva un cuarto de siglo trabajando en este proyecto. Pasó un invierno completo en el Polo Sur en 1994 y dice haberse «enganchado» desde entonces. Ha ido en total veinticuatro veces, y actualmente dirige los experimentos herederos de BICEP2, que incluyen Keck Array y BICEP3. BICEP4 los seguirá en breve.



La antena del telescopio BICEP2, a la izquierda del edificio, a solo 1 km del Polo Sur.

La señal que buscan es tan débil que para intentar detectarla hay que medir diferencias en la temperatura del cielo del orden de la milmillonésima parte de un grado. Se trata, en concreto, de un patrón específico en la polarización de la radiación de fondo de microondas. Que esta radiación esté polarizada significa que las ondas de luz muestran preferencia por vibrar en una dirección más que en otras. Y hoy se sabe que, si el espacio-tiempo está moviéndose por el avance de ondas gravitacionales, entonces la luz que lo llena debe mostrar un patrón específico de polarización; un patrón que debe haber quedado impreso, como congelado, en la radiación. Es el llamado modo B.

En 2014 Kovac y su equipo creyeron haber detectado estas ínfimas diferencias de temperatura en la radiación de fondo. Y lo cierto es

que, según explicó este astrofísico, efectivamente detectaron una señal con ese grado de precisión. Lo que falló fue la interpretación acerca de qué estaba causando esa señal.

«Las medidas de BICEP2 [el telescopio empleado] no estaban equivocadas, de hecho, fueron sometidas a un escrutinio intenso», dijo Kovac. «Dedicamos años a determinar que nuestra medida era real, y no un artefacto de nuestro experimento, porque era muy importante para nosotros». Sin embargo, el equipo hizo una estimación errónea sobre la posible contaminación de la señal. Ellos ya sabían que parte de la señal debía proceder de fuentes ajenas a las ondas gravitacionales, como el polvo galáctico, pero cuando hicieron su anuncio nadie disponía aún de datos sobre cuánto emite ese polvo. El equipo interpretó como más probable «que la señal procediera de ondas gravitacionales del *big bang*, con una aportación probablemente pequeña de otras fuentes, como el polvo galáctico. Pero todos sabíamos, desde el principio, que necesitábamos medidas directas [del polvo] para confirmar esta interpretación».

Si hubieran transcurrido años sin ninguna información adicional, lo ocurrido se habría entendido como el devenir habitual de la ciencia: se llega a las mejores conclusiones posibles en función de los datos disponibles, y si llegan mejores datos, pues se revisan las conclusiones en consecuencia. Pero en esta ocasión las esperadas medidas directas del polvo llegaron solo unos meses después. Las proporcionó el equipo del satélite Planck, de la Agencia Espacial Europea (ESA), que también midió con gran precisión la radiación de fondo.

Cuando empezaron a estar disponibles los nuevos datos de Planck quedó claro que había una sorpresa: el polvo podía ser más brillante de lo que predecían los viejos modelos. «Tras un análisis largo y cuidadoso, en una colaboración excelente entre nuestro equipo y el de Planck, encontramos que la emisión del polvo de nuestra galaxia supone como mínimo el 40 % de la señal de BICEP2, y tal vez toda», dijo Kovac.

Así que la búsqueda de las ondas gravitacionales primordiales prosigue, y está más reñida que nunca. Hay al menos una docena de grupos en todo el mundo a la caza del modo B en la polarización. Uno de ellos está en España. Sus telescopios están en el Observatorio del Teide, en Tenerife.

Quijote celeste

Ya hemos hablado de las vistas en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma. Las del Observatorio del Teide no impresionan menos. Hay torres, cúpulas, una pirámide llena de

instrumentos para estudiar el Sol y el volcán de fondo. Uno de los últimos telescopios en llegar a la familia es el segundo del experimento QUIJOTE CMB (del inglés Q-U-I JOint Tenerife CMB Experiment), nacido específicamente —como su compañero— para medir el modo B de la polarización del fondo de microondas.

El primero de los telescopios QUIJOTE empezó a tomar datos en noviembre de 2012; el segundo se inauguró en 2015. En el experimento participan el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), el Instituto de Física de Cantabria, el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones (Santander), el Observatorio Jodrell Bank (Manchester, Reino Unido), el Cavendish Laboratory (Cambridge, Reino Unido), y la compañía española IDOM.

Rafael Rebolo, director del IAC e investigador principal de QUIJOTE, explica que el nombre del experimento no alude solo a su importante componente hispano, sino también a su objetivo: para determinar los modos de polarización de la luz se emplean ciertos parámetros descritos por el matemático irlandés George Gabriel Stokes en 1852, y los necesarios para el ansiado modo B son los parámetros Q y U. Esta aclaración es para quienes dudan del valor de la ciencia básica: ¡para aclarar cómo empezó el universo hay que usar un trabajo matemático de hace siglo y medio sobre una característica de la luz! Stokes fue, como Isaac Newton en el siglo XVII, presidente de la prestigiosa Royal Society británica, y profesor en la Cátedra Lucasiana de la Universidad de Cambridge, puesto que también ocuparía mucho después Stephen Hawking.



El experimento QUIJOTE, ubicado en el Observatorio del Teide, del Instituto de Astrofísica de Canarias.

A Rebolo, que ha dedicado buena parte de su carrera al estudio de la radiación de fondo de microondas, pocos retos podrían atraerle más que la detección del modo B. «No va a ser fácil medirlo», advierte por teléfono. «Implica medir la temperatura de la radiación de fondo con una precisión de submillonésimas de grado». E implica también, por supuesto, asegurarse de que el ruido que contamina la señal se conoce a la perfección.

Lo que distingue a QUIJOTE del resto de experimentos, explica Rebolo, no es tanto su sensibilidad como el tipo de medidas que realiza. Uno de los inconvenientes de BICEP2 es que observaba en una única frecuencia, que resulta ser la misma en que también emite —y, según se sabe ahora, muy intensamente— el polvo presente en nuestra propia galaxia. QUIJOTE «tiene seis frecuencias activas», explica Rebolo. Son frecuencias distintas de las de BICEP2, y eso salva al experimento de la influencia del polvo galáctico, aunque no de la emisión llamada sincrotrón, que está causada por electrones acelerados que bañan el espacio interestelar. Por eso uno de los primeros objetivos de QUIJOTE es caracterizar de forma muy precisa esta señal de fondo, que deberá ser restada de las medidas.

Eso significa que el trabajo de QUIJOTE no será fácil ni rápido: se tardará al menos diez años en completar los 3000 mapas de la radiación de fondo en cada frecuencia que se necesitan para poder

identificar con seguridad la señal que interesa. La clave —en términos poco precisos— está en que la polarización debida a la radiación sincrotrón de la galaxia puede variar, pero la de la radiación de fondo permanece constante —al menos en la escala de tiempo humana—. Para Rebolo no hay duda de que la espera merece la pena. Para empezar, porque «en el camino también iremos produciendo ciencia interesante»; y para seguir, porque ¡son tantas cosas las que cuenta el modo B! No solo se confirmaría que la inflación ocurrió, se sabría también a qué energía se produjo, un dato importante para escoger entre modelos cosmológicos. Rebolo dice:

> Es muy difícil ganar [la carrera por detectar el modo B de la polarización de la radiación de fondo], pero si no lo intentamos nunca sabremos hasta dónde podríamos haber llegado. Las características de nuestro experimento hacen que tengamos posibilidades razonables de éxito. Además, llegar primero solo sirve si lo has hecho bien. En este momento nos preocupamos por hacer la mejor investigación posible, más que por llegar antes.

Capítulo 6

Túneles en el espacio… y en el tiempo

… Dinanzi a me non fuor cose creat
se non etterne, e io etterno duro.
Lasciate ogni speranza, voi ch'entrate…

Con esas palabras, grabadas en oscuros caracteres en su puerta, alerta el infierno de su propia eternidad, según narró en el siglo XIII el florentino Dante Alighieri en su *Divina comedia*. «Oh vosotros los que entráis, ¡abandonad toda esperanza!». No es seguro que sea eterno el universo, como tampoco que nada eterno existiera antes que él. Pero sí es bastante probable que, de ahora en adelante, al adentrarse en este capítulo, haya que abandonar la esperanza. La esperanza de confiar en la propia intuición para entender el cosmos. Como afirma Carl Sagan en *Pale Blue Dot*, el universo no está hecho para nosotros:

Nuestros ancestros entendían los orígenes extrapolando de su propia experiencia […] Y [para ellos] el universo no era mucho mayor de lo que nosotros podemos ver, ni era mucho más antiguo que nuestra historia escrita u oral, ni muy diferente de los lugares que conocemos. […] Llegó entonces la ciencia y nos enseñó que nosotros no somos la medida de todas las cosas, que existen maravillas ni siquiera imaginadas, que el universo no está obligado a cumplir con lo que nosotros consideramos cómodo o plausible.

Lo que se cuenta en las páginas siguientes queda muy lejos de lo que podemos percibir y probablemente intuir. Lo mismo ocurre, desde luego, con la mayoría de los fenómenos que pueblan los capítulos anteriores. Pero hay una diferencia: hasta ahora hemos hablado de predicciones que, o bien se han cumplido, o están apuntaladas por múltiples evidencias. A partir de ahora, el terreno es mucho más resbaladizo, porque ni la física teórica —el puente de las matemáticas al que se refería Juan García-Bellido en el capítulo «Gravedad»— ni los datos experimentales pueden todavía conferirle solidez. Aún así lo que se cuenta está en las ecuaciones y ya ha demostrado la historia —con los agujeros negros y las ondas gravitacionales— que las ecuaciones pueden ganar por goleada a la intuición.

Ecuaciones

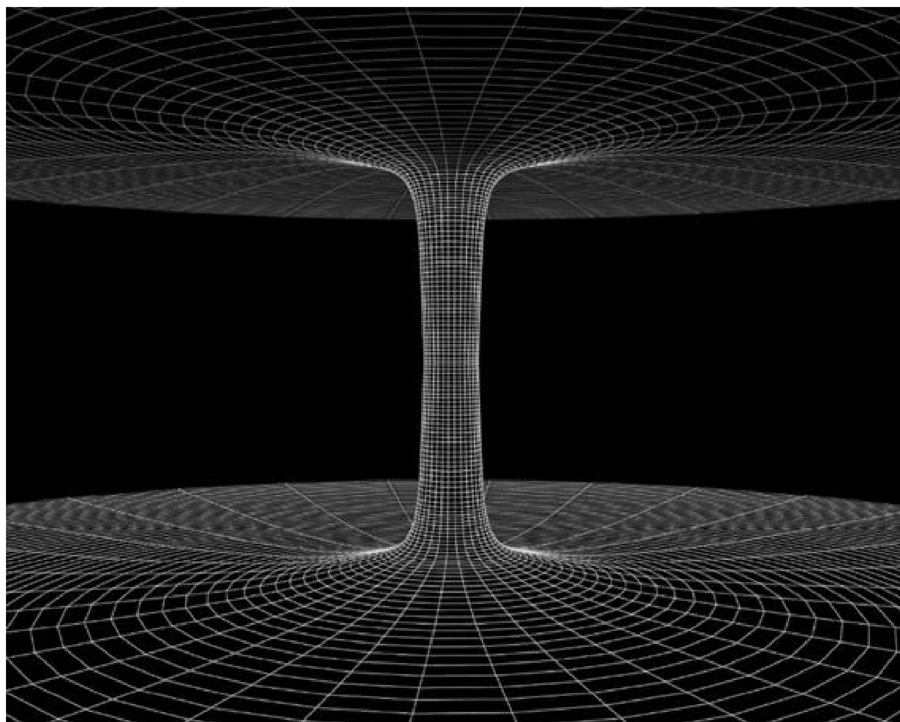
Solo un año después de que Albert Einstein publicara su teoría de la relatividad general, en 1916, el físico austríaco Ludwig Flamm

estudiaba una de las soluciones que otro renombrado físico, Karl Schwarzschild (véase el capítulo «Cuando la gravedad agujerea…») halló para las ecuaciones de Einstein. Schwarzschild describía una forma particular de agujero negro, pero Flamm se dio cuenta de que también había otra solución, que plantea la existencia de lo que más tarde sería conocido como «agujero blanco».

Un agujero blanco —esto sí es intuitivo— es justo lo contrario de un agujero negro; mientras que el primero actúa absorbiendo cualquier materia que cruza su horizonte de sucesos (de nuevo, véase el capítulo «Cuando la gravedad agujerea…»), un agujero blanco funciona como una fuente que expulsa materia de su horizonte de sucesos. Algunos incluso han especulado con que haya un agujero blanco al «otro lado» de cada agujero negro, donde toda la materia absorbida por el agujero negro es expulsada en algún universo alternativo. Se ha llegado a teorizar que incluso lo que conocemos como el *big bang* podría ser, de hecho, el resultado de un fenómeno así.

Flamm también se percató de que las dos soluciones —la «negra» y la «blanca», por así decir—, podrían ser matemáticamente conectadas por una especie de conducto, y que, al menos en teoría, el agujero negro de «entrada» y el agujero blanco de «salida» podrían ser diferentes partes del mismo universo o, incluso, comunicar diferentes universos.

El mismo Einstein exploró estas ideas de Flamm en 1935, junto con el físico Nathan Rosen. Einstein y Rosen propusieron la existencia de caminos o «pasarelas» a través del espacio-tiempo y los denominaron «puentes de Einstein-Rosen». Se crea así, en teoría, una especie de acceso directo entre dos puntos muy alejados en el espacio-tiempo, un conducto que podría reducir la duración del viaje y la distancia. Ello permitiría, por ejemplo, el viaje interestelar en lapsos de tiempo muy cortos, algo que a la limitada velocidad de la luz llevaría décadas, cientos o miles de años.



Esquema de un agujero de gusano conectando dos zonas diferentes del espacio-tiempo.

Para una posibilidad tan atractiva para la imaginación —¡nada menos que poder viajar rápidamente a otras estrellas!—, la expresión «puentes de Einstein-Rosen» es poco descriptiva. John Wheeler, el físico teórico estadounidense que también acuñó el término «agujero negro», dio en 1957 con una alternativa que triunfó rápidamente. El ejercicio que propuso Wheeler fue el siguiente: imaginemos a un gusano sobre una manzana, si el gusano se mantiene siempre sobre la superficie de la fruta, la distancia que debe recorrer para llegar desde donde esté al punto diametralmente opuesto —lo que en el globo terráqueo serían las antípodas— siempre será la mitad de la circunferencia de la manzana. Pero si en vez de quedarse en la superficie el gusano excava un túnel a través de la manzana, la distancia que deberá recorrer será considerablemente menor. De ahí la expresión «agujero de gusano». Si cambiamos la jugosa manzana por nuestro enorme universo, y el pequeño anélido por un aguerrido explorador espacial, la analogía es evidente; en vez de llamarlos «puentes de Einstein-Rosen» podemos hablar de «agujeros de gusano», un término tan cautivador como el de «agujeros negros».

¿Son reales?

Los agujeros de gusano contienen dos bocas o entradas, muy probablemente esferoidales, con un túnel que conecta ambos extremos. La teoría de la relatividad general de Einstein predice matemáticamente la existencia de los agujeros de gusano, pero hasta la fecha no se ha encontrado ninguno. Es importante recalcar que, mientras que tenemos pruebas observacionales sólidas de la existencia de los agujeros negros, los agujeros de gusano de momento solo existen en las ecuaciones y en la imaginación.

Al igual que ocurre con los objetos muy masivos, un agujero de gusano podría ser descubierto por la forma en que su enorme gravedad afecta a la luz que pasa cerca de él. Ciertas soluciones de la relatividad general permiten la existencia de los agujeros de gusano en la boca de un agujero negro, pero la mayor parte de los teóricos piensan que estos son muy inestables y se colapsan enseguida, o que la intensa radiación y las fuerzas que rodean la entrada del agujero de gusano destruirían lo que se atreviese a intentar penetrarlo.

El mayor problema radica en que las ecuaciones de Einstein se «rompen», no pueden aplicarse en el interior de un agujero negro o de un agujero de gusano, ya que la relatividad funciona para la gravedad, pero como ya hemos visto en capítulos anteriores no casan nada bien con las fuerzas cuánticas que gobiernan el mundo subatómico.

La ciencia ficción está llena de historias de viajes a través de los agujeros de gusano, como la famosa novela —y película— *Contacto*, de Carl Sagan, o la película *Interestelar* (véase el recuadro «Los agujeros de gusano en el cine»). Pero la realidad de ese tipo de hipotéticos viajes es más complicada. El primer problema es el tamaño. Se piensa que los agujeros de gusano que pudieran existir en la naturaleza son los denominados «primordiales», creados en los primeros instantes del universo tras la gran explosión, y de unas dimensiones microscópicas. Sin embargo, como el universo se está expandiendo, es posible que algunos de estos agujeros de gusano primordiales se hayan «estirado» hasta alcanzar tamaños mayores.

Otro problema proviene de la estabilidad. Los agujeros de gusano serían inútiles para un hipotético viaje a través de ellos, ya que, como hemos visto, colapsan rápidamente. Sin embargo, investigaciones recientes han postulado que un agujero de gusano que contenga materia «exótica» podría permanecer abierto y sin cambios durante períodos más largos de tiempo. La materia exótica, que no debe confundirse con la materia oscura o la antimateria, contiene una densidad de energía negativa y una gran presión negativa, propiedades ambas que se deducen del comportamiento de ciertos estados de vacío como parte de la teoría cuántica de campos. Si los

agujeros de gusano contienen suficiente materia exótica, tanto si se producen de forma natural como si se pudiesen generar artificialmente, en teoría podrían ser utilizados como un método de envío de información o viajeros a través del espacio.

Aunque la adición de materia exótica a un agujero de gusano podría estabilizarlo hasta el punto de que un hipotético pasajero podría viajar con seguridad a través de él, todavía existe la posibilidad de que al añadir materia «normal» —la nave espacial o el propio astronauta— el portal se desestabilizara. La tecnología actual no está en absoluto capacitada para aumentar o estabilizar los agujeros de gusano, aunque se encontraran, y mucho menos para fabricarlos, por supuesto.

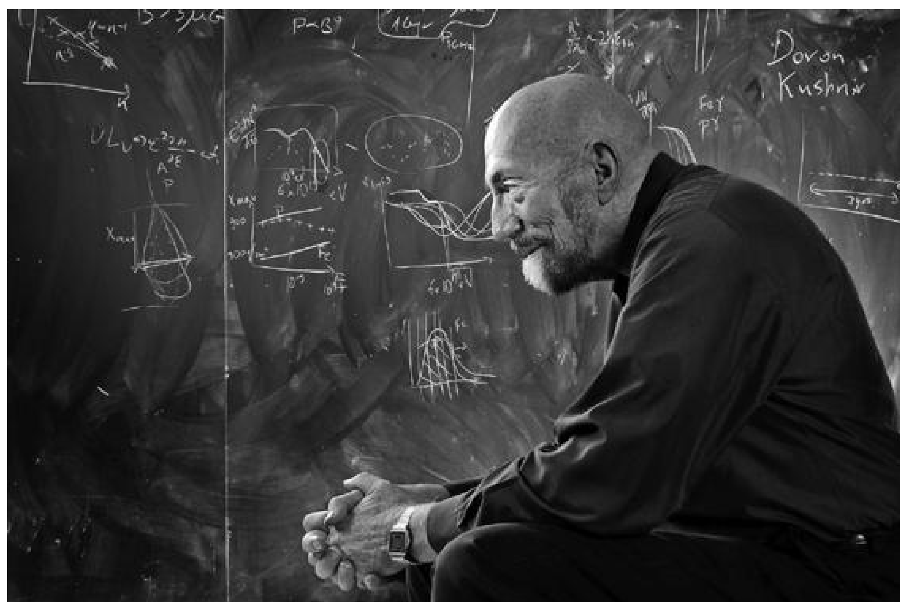
No por ello los científicos van a dejar de explorar el concepto como un método de viajar más allá de nuestro sistema solar, con la esperanza de que la tecnología será capaz de generarlos y utilizarlos en un lejano futuro.

Paradojas temporales

Cuando uno de los mayores especialistas mundiales en gravitación y relatividad, el físico teórico Kip Thorne (a quien ya conocemos de capítulos precedentes) comenzó a considerar la posibilidad de viajar en el espacio usando los agujeros de gusano como si fueran una especie de suburbano cósmico, se dio cuenta de que también podrían emplearse para viajar en el tiempo.

En su libro de 1994 *Black Holes and Time Warps* (cuya versión en español, publicada por la editorial Crítica en el año 2000, se tituló *Agujeros negros y tiempo curvo*), Thorne propone un curioso experimento mental: supongamos que el famoso físico consigue abrir un pequeño agujero de gusano que conecta dos puntos en el espacio como si no estuvieran separados por ninguna distancia. Thorne toma el agujero de gusano y pone un extremo en su sala de estar, y el otro a bordo de una nave espacial estacionada enfrente de su casa. La esposa de Thorne, Coralee, sube a bordo de la nave espacial, dispuesta a emprender un viaje. Los dos no tienen que decirse adiós, sin embargo, pues no importa lo lejos que viaje Coralee: ambos podrán seguir viéndose a través del agujero de gusano. Incluso pueden tomarse de la mano, como si de una puerta abierta se tratara. Coralee pone en marcha la nave espacial, despega hacia el espacio y viaja durante seis horas a la velocidad de la luz. A continuación, da la vuelta y regresa a casa a la misma velocidad, doce horas en total. Mientras, Thorne observa a través del agujero de gusano cómo transcurre el viaje, y ve a Coralee regresar de su singladura, aterrizar en el jardín delantero, salir

de la nave espacial y encaminarse hacia la casa. Pero cuando Thorne mira por la ventana en su propio mundo, su jardín delantero está vacío: Coralee no ha regresado. Debido a que su mujer ha viajado a la velocidad de la luz, el tiempo se ralentizó para ella, como afirma la relatividad especial; lo que fueron solo doce horas de viaje para Coralee han sido nada menos que diez años para Thorne en la Tierra.



El físico Kip Thorne.

La paradoja es que como Thorne y Coralee pueden cogerse de la mano a través del agujero de gusano, ambos están viajando en el tiempo. Coralee ha aterrizado en la Tierra diez años después de marcharse, y se reúne con Thorne, diez años mayor. Pero ella también puede llegar a su casa a través del agujero de gusano y encontrar a Thorne, que es solamente doce horas más viejo, como ella. Por su parte, Thorne puede cruzar el agujero de gusano y encontrarse a sí mismo diez años en el futuro, o su yo futuro puede retroceder diez años en el pasado. Esta singular propuesta teórica del libro de Thorne está realmente destinada a responder a una pregunta más profunda: ¿prohíben las leyes de la física viajar en el tiempo? De hecho, todos viajamos en el tiempo hacia el futuro a una velocidad de un segundo por segundo, pero esa es nuestra percepción.

¿Pues qué es el tiempo? Nosotros lo percibimos como una constante en una única dirección, pero Albert Einstein demostró que realmente el tiempo es una ilusión, es relativo, pues puede variar para diferentes observadores dependiendo de la velocidad a la que se

muevan en el espacio o si se hallan en las cercanías de un campo gravitacional. Así, para Einstein, el tiempo es una cuarta dimensión. El espacio tridimensional nos proporciona unas coordenadas de situación tales como la longitud, la anchura y la altura, mientras que el tiempo es otra coordenada más, la de dirección, aunque convencionalmente solo se mueva hacia adelante.

Una constatación palpable de esta relatividad del tiempo viene dada por una aplicación tecnológica de uso generalizado y diario en nuestra sociedad, como es el uso de la navegación y posicionamiento por satélite, el famoso sistema GPS.

Para poder dar un servicio de tiempo y posición lo más exacto posible, el reloj atómico a bordo de los satélites GPS debe tener una precisión exquisita de entre 20 y 30 nanosegundos (o milmillonésimas de segundo). Sin embargo, debido a que los satélites están en constante movimiento con relación a los observadores en la Tierra, los efectos predichos por las teorías especial y general de la relatividad se deben tener en cuenta para lograr la precisión deseada. Debido a que un observador en tierra ve a los satélites en rápido movimiento con respecto a él —a muchos miles de kilómetros por hora—, la relatividad especial predice que deberíamos ver sus relojes moviéndose más lentamente que los emplazados en tierra, en concreto unos siete microsegundos por día debido al efecto de esta dilatación temporal.

Además, los satélites orbitan a unos 20 000 kilómetros por encima de la Tierra, donde la curvatura del espacio-tiempo debido a la masa de nuestro planeta es menor de lo que está en la superficie de este. Así, una predicción de la relatividad general es que los relojes que se encuentran más cerca de un objeto masivo parecen moverse más lentamente que los situados más lejos. Un cálculo utilizando la relatividad general predice que los relojes de cada satélite GPS deben ir por delante de los relojes basados en tierra unos 45 microsegundos por día.

La combinación de estos dos efectos, el del retraso del tiempo por la relatividad espacial (-7 microsegundos), y el adelanto por la relatividad general (+45 microsegundos), significa que los relojes a bordo de cada satélite deberían marcar más rápido que los relojes idénticos en tierra unos 38 microsegundos por día (45 - 7 = 38). Esto parece muy poco pero, como se ha mencionado, la alta precisión necesaria para el sistema GPS exige una exactitud de entre 20 y 30 nanosegundos, y 38 microsegundos son nada menos que 38 000 nanosegundos, mil veces más que la precisión requerida. De hecho, si no se efectuara esta corrección relativista, los errores de posición y

tiempo se acumularían, y de un día para otro superarían los 2 minutos de tiempo y varios kilómetros de posición. Sin Einstein, los GPS simplemente no funcionarían. Y, por otra parte, este hecho cotidiano es una demostración irrefutable de las teorías de la relatividad especial y general.

En cierto sentido, además, podríamos también decir que los astronautas de la Estación Espacial Internacional son viajeros del tiempo, ya que cuando regresan a la Tierra tras haber volado durante meses a 28 000 km/h en la órbita terrestre, por el efecto de la dilatación temporal, son unas millonésimas de segundo más jóvenes que los humanos que vivimos en la superficie del planeta.

Recetas para máquinas del tiempo

Las diminutas alteraciones en el tiempo que observamos en los GPS no responden a nuestra pregunta: ¿es posible viajar en el tiempo? Obviando las dilataciones temporales predichas por la relatividad general, que como sabemos permitirían a un astronauta una especie de viaje hacia el futuro si se desplazase a velocidades cercanas a la de la luz, viajar en el tiempo en el pasado, hacia atrás, sigue sin resolverse. La opinión del reputado cosmólogo Stephen Hawking era clara a este respecto, pues declaró rotundamente que las leyes de la física impiden que se pueda viajar hacia atrás en el tiempo.

Además de la aparente imposibilidad física, los viajes en el tiempo también nos dan unos contrasentidos inquietantes, como la famosa paradoja del abuelo. En este ejemplo clásico, un viajero en el tiempo se desplaza a su pasado y mata a sus padres o a su abuelo —recordemos películas como *Terminator*—, por lo que nunca habría nacido y por ello tampoco podría haber viajado en el tiempo para cometer el asesinato.

En el mundo de la ficción, los viajes en el tiempo, al igual que los que se realizan a través de los agujeros de gusano, han sido un tema muy popular. Comenzando con novelas tan famosas como *La máquina del tiempo* de H. G. Wells, publicada en 1895, hasta películas o series de televisión como *Star Trek, Doctor Who* o *Regreso al futuro*. En todas ellas, sus protagonistas emplean un vehículo de algún tipo —una máquina del tiempo— y viajan al pasado o al futuro, listos para emprender nuevas aventuras.

Investigaciones teóricas sobre la posibilidad de una máquina del tiempo nos dicen que para que funcionasen habría que «doblar» el espacio-tiempo, de forma que las líneas de tiempo volvieran sobre sí mismas para formar un bucle. Para lograr esto, la hipótesis es que las máquinas del tiempo necesitarían una forma exótica de materia con

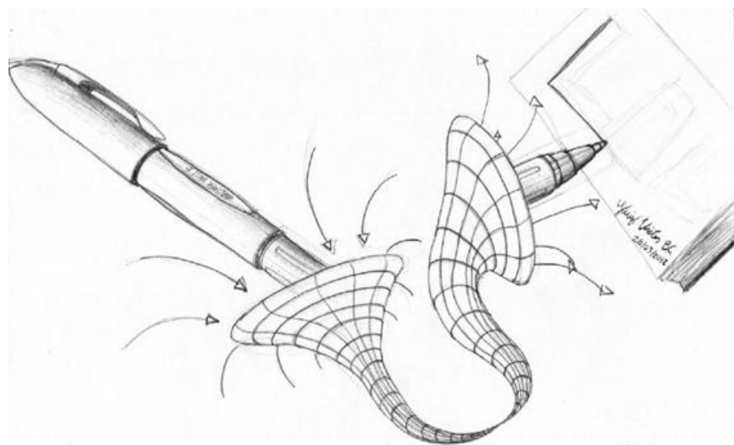
una llamada «densidad de energía negativa». Tal materia exótica —de la que ya hemos hablado más arriba en relación con la estabilidad de los agujeros de gusano— tendría propiedades tan extrañas como la capacidad de moverse en dirección opuesta a la de la materia normal cuando se la empuja. Tal materia podría existir en teoría, pero, incluso si lo hiciera, quizás solo sería en cantidades demasiado pequeñas para permitir la construcción de una máquina del tiempo.

Los agujeros de gusano en el cine

El recurso de poder viajar rápidamente de un lugar a otro del universo a través de agujeros de gusano ha sido ampliamente utilizado en la ciencia ficción, y la esperable espectacularidad de un suceso así los convierte en herramientas muy comunes en numerosas películas. Mencionemos solo algunas de las más conocidas que emplean agujeros de gusano o similares como núcleo central de sus argumentos.

- *Star Trek, la película* (1979). Basada en la archifamosa serie de televisión, este largometraje muestra cómo una primitiva sonda espacial terrestre, la *Voyager 6*, se fusionó con una máquina alienígena haciéndose consciente y buscando a sus creadores humanos con la ayuda de agujeros de gusano para desplazarse por el universo. Al final de la película, *Voyager 6* desaparece en el interior de un agujero negro, o quizá en un agujero de gusano, no queda muy claro en el hilo argumental.
- *Stargate* (1994). Unos antiquísimos portales de un mineral muy pesado en forma de anillo son los *stargates* o «puertas a las estrellas», capaces de generar una especie de agujeros de gusano que permiten la transmisión unidireccional de materia. El curioso horizonte de sucesos (véase el capítulo «Cuando la gravedad agujerea…») de estos agujeros muestra un aspecto como de lámina de agua, que al ser cruzada transforma la materia en una energía que es misteriosamente reconstituida de nuevo al llegar al otro portal. Esta fantástica posibilidad da pie a múltiples aventuras de los exploradores que se atreven a cruzar los *stargates*. La película dio tanto de sí que hubo varias series de televisión de esta franquicia.
- *Contacto* (1997). A partir de la novela del mismo título del popular científico y divulgador Carl Sagan, se narra la historia de una astrofísica que, utilizando una máquina construida gracias a las instrucciones de un mensaje extraterrestre recibido en radiotelescopios, consigue llegar al centro de nuestra galaxia a través de varios agujeros de gusano generados por dicha máquina. Uno de los protagonistas menciona que han usado puentes de Einstein-Rosen para su increíble viaje.
- *Interestelar* (2014). Científicos de la NASA descubren un agujero de gusano orbitando alrededor del planeta Saturno, y lo emplean para enviar una nave espacial a través de él con el objetivo de buscar un nuevo mundo habitable, ya que la Tierra se encuentra muy deteriorada por el cambio climático. Este agujero de gusano transporta a los protagonistas a otro sistema estelar en el otro

extremo del universo dominado por un agujero negro gigante que denominan Gargantúa, y en torno al cual giran dos planetas habitables. En esta película, que contó con la asesoría —y la producción ejecutiva— del físico especialista en agujeros de gusano Kip Thorne, se supone que es la humanidad del futuro la que colocó el agujero de gusano para que los humanos del presente pudieran encontrar un nuevo hogar. Para el escritor George R. R. Martin, autor de *Juego de Tronos*, «*Interestelar* es la película de ciencia ficción más ambiciosa y provocadora desde *2001* de Kubrick».



¿Pueden servir los agujeros de gusano para viajar de un punto a otro del universo?

Otra forma de construir una máquina del tiempo sin invocar materia exótica sería insertar un agujero con forma de rosquilla en el interior de una esfera. Dentro de este vacío con forma de rosquilla, el espacio-tiempo podría doblarse sobre sí mismo utilizando campos gravitacionales dirigidos para formar una curva cerrada en el tiempo. Para viajar en el pasado, un «crononauta» tendría que moverse por el interior de la rosquilla, yendo más hacia atrás en el tiempo con cada vuelta. No obstante, esta teoría tiene una serie de obstáculos. Los campos gravitacionales necesarios para establecer una curva de tiempo cerrada tendrían que ser muy fuertes y su manipulación habría de ser muy precisa.

Por último, otra teoría para los potenciales viajeros del tiempo implica las llamadas «cuerdas cósmicas», unos hipotéticos defectos en la forma del espacio-tiempo. Estas regiones extraordinariamente largas y delgadas —del grosor de grandes cantidades de masa que, por tanto, deformarían el espacio-tiempo a su alrededor. La manipulación de estas cuerdas entre sí podría crear series de curvas de tiempo cerradas, permitiendo el viaje temporal.

En definitiva, para poder construir una máquina del tiempo necesitamos encontrar cosas que no sabemos si existen —materia

exótica, cuerdas cósmicas—; fabricar y dominar tecnologías aún por inventar y, por último, pero no menos importante, desarrollar una nueva física que permita todo ello. Hoy por hoy, y a la luz de nuestro conocimiento del universo, los viajes en el tiempo hacia el pasado simplemente no son posibles.

Agradecimientos

Este libro ha sido construido en gran parte con entrevistas a investigadores en activo. Agradecemos enormemente su tiempo y generosidad a todos ellos, también a los que no aparecen citados: Ignacio García de la Rosa, Tanausú Génova Santos, Antonio Mampaso Recio, Marina Manganaro y Evencio Mediavilla Gradolph. Ha sido un gran placer hablar con ellos.

Apéndices

Bibliografía recomendada

J. Carey (ed.), *Eyewitness to Science: Scientists and writers illuminate natural phenomena from fossils to fractals*, Harvard University Press, 1997.

> Esta recopilación de textos breves en que diversos autores —algunos son científicos; otros, lo que hoy serían llamados «divulgadores»— explican hallazgos en ámbitos muy diversos de la ciencia es una joya para los amantes de la historia de la ciencia. Uno es un artículo publicado por Isaac Asimov en el *Daily Telegraph* en 1979 sobre Cygnus X-1; en él explica con la claridad que le es propia qué es un agujero negro. Del mismo año es una reflexión de Carl Sagan acerca de la capacidad humana para comprender el universo. También hay extractos de los textos ganadores de un concurso convocado por *Scientific American* para explicar la relatividad general. Así como una poesía dedicada a la fuerza de la gravedad, de 1990, de John Frederick Nims.

B. Greene, *El universo elegante*, Editorial Planeta, Colección Booket Ciencia, 2012.

> Con un estilo asequible y directo, Greene expone la aún no demostrada teoría de las supercuerdas, con la que los físicos fundamentales intentan unificar la ley de la relatividad general y la mecánica cuántica. Los primeros capítulos explican con claridad y en profundidad la relatividad general.

K. S. Thorne, *Agujeros negros y tiempo curvo: el escandaloso legado de Einstein*, Editorial Crítica, 2010.

> Uno de los más aclamados libros de divulgación sobre la gravedad y sus efectos en el universo. Las explicaciones de los conceptos físicos son magníficas, pero la narración sobre cómo los científicos han ido desvelando un misterio astrofísico tras otro y cambiando así nuestra visión del cosmos es aún mejor. Thorne escribe con honestidad, cercanía y respeto, y contagia al lector toda su emoción.

«Gravitación». Proyecto Cosmoeduca del Instituto de Astrofísica de Canarias. Accesible en: http://iac.es/cosmoeduca/gravedad/index.html Cosmoeduca es un material preparado con fines pedagógicos por investigadores del Instituto de Astrofísica de Canarias y por profesores. Las explicaciones y los recursos propuestos están pensados para un público con conocimientos muy básicos de ciencia o incluso sin ellos, y tienen un enfoque «científico-cultural-humano», señalan los autores. El bloque temático dedicado a la gravedad ayuda a entender las diferencias entre las visiones de Newton y la de Einstein, y también por qué y cómo surgieron. Incluye experimentos

«caseros» (pero, ojo, no se trata de hacer caer bolas por planos inclinados, sino de profundizar en los conceptos).

Glosario

Año luz: La distancia que recorre la luz en un año en el vacío, equivalente a 9 460 000 000 000 km.

Constante cosmológica: La fuerza introducida por Einstein en sus ecuaciones de la relatividad general para contrarrestar la atracción gravitatoria del universo.

Cuerpo negro: Cuerpo ideal que absorbe toda la radiación que le llega y la reemite de modo homogéneo. El físico alemán Max Planck demostró que un cuerpo negro ideal a una temperatura dada tiene un espectro perfectamente definido y característico. La radiación de fondo cósmico, por ejemplo, corresponde a un cuerpo negro prácticamente perfecto a la temperatura de 2,7 K. El Sol tiene un espectro que se puede aproximar por un cuerpo negro a unos 5800 K.

Curvatura: Es una propiedad matemática de los cuerpos geométricos (curvatura exterior) o del propio espacio (curvatura interior) que de modo formal recoge lo que intuitivamente entendemos como una separación de la planitud. Un cuerpo (o un espacio) plano tiene curvatura nula, mientras que en el caso de superficies de dos o más dimensiones hablamos de curvaturas positivas o negativas según sea su forma.

Disco de acreción: Cuando en un sistema binario de estrellas, una de ellas explota como supernova, colapsando para formar un agujero negro, su potentísimo campo gravitacional puede absorber la materia de la estrella compañera, que cae en forma de un filamento de plasma formando un anillo de material que gira rápidamente en espiral en torno al agujero. Este anillo se denomina «disco de acreción».

Estrella binaria: Sistema de dos estrellas que orbitan alrededor de un centro de gravedad común. Un gran número de estrellas pertenece a estos sistemas binarios.

Galaxia: Conjunto de estrellas, polvo, gas, planetas y materia y energía oscuras cohesionado por la gravitación. En el universo observable existen más de 100 000 millones, cada una de ellas con más de 100 000 millones de estrellas. Según su forma aparente, se clasifican en elípticas, espirales, lenticulares e irregulares. Las galaxias se agrupan en cúmulos de galaxias, y estos, en supercúmulos.

Límite de Eddington: Límite del ritmo al que un agujero negro puede tragar materia.

Ondas gravitacionales: Las deformaciones del espacio-tiempo causadas por cuerpos de gran masa en movimiento.

Perihelio: El punto de la órbita de mayor acercamiento al Sol.

Singularidad: Desde el punto de vista matemático es un punto en el

que una función u objeto matemático no está bien definido. En física se utiliza para definir lugares o instantes de tiempo en los que una magnitud física diverge, es decir, crece sin límite, como ocurre con la densidad o la temperatura en el instante inicial del universo.





MÓNICA GONZÁLEZ SALOMONE. Es periodista. Disfruta muchísimo con su trabajo, que consiste en descubrir y contar historias. Muy al principio de su carrera —hace ya tres décadas— advirtió que los científicos y científicas son una fuente inagotable de historias emocionantes, historias capaces de cambiar la visión del mundo de aquellos que las leen. Por eso muchos de sus textos, publicados en medios nacionales e internacionales —sobre todo en El País y en la Agencia SINC–, narran lo que pasa en los laboratorios y observatorios, en las pizarras de los matemáticos, en las mentes de las físicas teóricas. Son crónicas enviadas desde el primer frente de avance del conocimiento y están pensadas para hacer disfrutar a cualquiera. Es autora de *Morir joven, a los 140* (2016) y *Un Universo Gravitacional* (2016).

ÁNGEL GÓMEZ ROLDÁN (Madrid, 1965). Es escritor y divulgador científico especializado en Astronomía y Ciencias del Espacio. Ha trabajado durante más de catorce años como operador de telescopios en el Observatorio del Teide del Instituto de Astrofísica de Canarias. Además de haber impartido cursos de Astronomía durante una década para profesores de secundaria, es responsable del área web de la Asociación Científico-Cultural Shelios en expediciones científicas por todo el mundo para la observación de eclipses totales solares y lunares, auroras polares o lluvias de estrellas. Autor de libros como *Un Universo Gravitacional* (2016), *Historia de la Astronomía* (2002), *Crónica de la Exploración Espacial* (2004 y 2007), o *200 Maravillas del Cielo-200*

Celestial Wonders (2005), actualmente es el Editor Jefe de la prestigiosa revista mensual Astronomía que cumple 35 años de publicación.

Notas

[1] Referenciado en la sección «Bibliografía recomendada». < <

[2] Obra editada por la Fundación BBVA en 2015 para conmemorar el centenario de la teoría de la relatividad general. < <

[3] Conferencia impartida en la Fundación Ramón Areces. <<

[4] Incluida en el mismo ciclo de conferencias, organizado por la Fundación BBVA, en el que participó Elena Aprile, véase el capítulo «La gravedad del lado oscuro». < <